

**Monitoreo de la deformación del Volcán Nevado del Ruiz mediante el  
procesamiento de datos GNSS a través del Sistema de Referencia Espacial  
Canadiense**

**Alexandra Hernández Serrato**

**Julián Alberto Noboa Tobar**

Servicio Geológico Colombiano  
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales  
Universidad de Caldas  
Facultad de Ciencias Exactas, programa de Geología  
Manizales, Colombia  
Diciembre de 2021

**Monitoreo de la deformación del Volcán Nevado del Ruiz mediante el  
procesamiento de datos GNSS a través del Sistema de Referencia Espacial  
Canadiense**

**Alexandra Hernández Serrato**

**Julián Alberto Noboa Tobar**

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al  
título de:  
**Geólogo**

Director:

Especialista Milton Iván Ordóñez Villota

Codirectores:

Geólogo Juan José Idárraga Ocampo

Geólogo Cristián Mauricio López Vélez

Servicio Geológico Colombiano

Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales

Universidad de Caldas

Facultad de Ciencias Exactas, programa de Geología

Manizales, Colombia

Diciembre de 2021

**Nota de aceptación**

---

---

---

---



---

**Milton Iván Ordóñez Villota**  
**Director Trabajo de Grado**



---

**Juan José Idárraga Ocampo**  
**Codirector Trabajo de Grado**



---

**Cristián Mauricio López Vélez**  
**Codirector Trabajo de Grado**

*Dedicatoria*

*A la memoria de las 25.000 víctimas de Armero y Chinchiná  
causadas por la erupción del Volcán Nevado del Ruiz, él 13  
de noviembre de 1985.*

*A nuestros padres por su gran sacrificio y apoyo  
incondicional.*

## **Agradecimientos**

Al Servicio Geológico Colombiano y principalmente al Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales por abrirnos sus puertas, enriquecernos con el conocimiento profesional y personal durante estos años.

A nuestro director de tesis, Especialista Milton Iván Ordóñez Villota, por darnos la oportunidad de aportar nuestro granito de arena en el monitoreo de la deformación del Volcán Nevado del Ruiz y los demás volcanes del Segmento Volcánico Norte de Colombia. Por brindarnos la oportunidad de contribuir con nuestro apoyo a la gestión del riesgo volcánico. Le agradecemos por brindarnos su conocimiento sin reserva y guiarnos siempre para crecer como profesionales y personas, pero especialmente por su tiempo, paciencia y consejo en la elaboración de este trabajo.

A nuestro codirector, Geólogo Juan José Idárraga Ocampo, por permitirnos hacer parte en la investigación de la deformación del Volcán Nevado del Ruiz. Por estar siempre dispuesto y atento a nuestras solicitudes e inquietudes sin importar la hora ni el día. Por compartir con nosotros su conocimiento y su tiempo, asistiéndonos en la recolección y el procesamiento de los datos GNSS, sin los cuales este trabajo no sería posible.

Quizás lo más valioso e importante para nosotros, agradecerles a Milton y Juan José por brindarnos su amistad, que esperamos perdure en el tiempo.

A la Geóloga Gloria Patricia Cortés Jiménez, coordinadora del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, y al Geólogo Cristian Mauricio López Vélez, coordinador del proyecto “Operación y mantenimiento de redes de monitoreo volcánico” y del grupo “Investigación y monitoreo de actividad volcánica” por abrir las puertas a los estudiantes de la Universidad de Caldas para realizar sus trabajos de grado. Por escuchar y ayudar a los estudiantes interesados en investigaciones relacionadas con la vulcanología.

Al Ingeniero César Augusto Vega Salguero, por ofrecernos sus conocimientos en TICs con los cuales se pudo completar parte de este proyecto. Por su tiempo y su permanente disposición a ayudar.

A todos los profesionales y staff del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales por ser siempre amables y hacernos sentir como en casa.

A nuestros profesores de la Universidad de Caldas por enseñarnos las herramientas para convertirnos en profesionales integrales y para ser personas de bien.

Yo Julian Alberto Noboa Tobar expreso mi agradecimiento a mi madre Edilma Tobar Duque por estar siempre a mi lado y por ser el impulso y la razón de mis logros. A mi tío Nelson Tovar Duque por ser un apoyo incondicional y por cuidar de mi madre y de mi por tantos años. A mis abuelos por sus consejos y su cariño en todos los momentos de mi vida. A mis tías Ana Ruth Tovar Duque, Nhora Isabel Tovar Duque y Flor Alba Tovar Duque por siempre darme un aliento para seguir adelante.

A mi compañera de vida con quien emprendí este proyecto de tesis, con quien he compartido mi vida por más de cuatro años y siempre he recibido su apoyo, su paciencia y su compañía incondicional.

A mis amigos de vida Emanuel Zapata, Sebastián Jiménez, Carlos Mario Muriel, Samuel Naranjo y Juan Martín Giraldo por estar siempre ahí y brindarme su amistad incondicional.

A mis amigos y compañeros de la universidad: Daniel Muñoz, Oscar Gonzales, Natalia Arias, Santiago Suarez, Carolina Reina y Anthony Macías por haber hecho el paso por la universidad una experiencia maravillosa.

Yo Alexandra Hernández Serrato expreso mi agradecimiento a mi madre Luz Sandra Serrato Fetecua y mi abuelo Luis Alberto Serrato por su apoyo, su amor y permanente comprensión. Les agradezco por sus enseñanzas las cuales me permitieron ser honesta, trabajadora y sobre todo muy feliz. A los dos los amo y admiro, ya que a pesar de las circunstancias siempre han estado ahí para brindarme su apoyo y comprensión.

A mi tutor, el Presbítero Jubal Castelblanco Romero, mi padre adoptivo quien siempre apoyó mis sueños. Por siempre estar a mi lado y brindarme sus consejos, su comprensión, su cariño y por ser mi guía. El haberme inculcado la paciencia, la generosidad y constancia son sus mejores enseñanzas que guardaré como un tesoro siempre en mi vida.

A mi compañero de vida y de tesis, por su amor, soporte, e incondicionalidad en el transcurso de este sueño. Agradezco a mis compañera y amigas Carolina Reina Ladino y Juanita Gonzales Londoño quienes durante este tiempo y sin esperar nada a cambio compartimos alegrías y me brindaron su aliento durante los momentos de tristeza y desaliento. Por brindarme su amistad y principalmente sus consejos en momentos difíciles.

## Resumen

El Volcán Nevado del Ruiz (VNR) está ubicado en la Cordillera Central de Colombia y es actualmente es el volcán más activo del país monitoreado desde 1985 por el Servicio Geológico Colombiano - Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (SGC – OVSM).

El estudio de la deformación del VNR se inició en 1985. En 2007 se instalaron inclinómetros electrónicos y solo hasta 2010, se empezó la instalación de estaciones GNSS permanentes, estableciendo hasta 2021 una red de 30 estaciones para monitorear la deformación del VNR y los volcanes del Segmento Volcánico Norte de Colombia (SVNC).

Con este trabajo se continuó el apoyo de los estudiantes de geología de la Universidad de Caldas al área de geodesia del SGC – OVSM, mediante el procesamiento de los datos de las estaciones GNSS del VNR a través del Sistema de Referencia Espacial Canadiense (SRSC). Este apoyo permitió que el SGC – OVSM realizara el monitoreo de la deformación del VNR en tiempo cuasi real, es decir procesando los datos GNSS del día anterior con orbitas ultra-rápidas y rápidas, así como procesando los datos GNSS con un retraso promedio de 20 días empleando orbitas finales y obteniendo alta precisión. Se generaron series de tiempo con el comportamiento tectónico de las estaciones GNSS del VNR que permitieron determinar la velocidad tectónica. Tres estaciones GNSS del VCM se emplearon para remover el efecto tectónico de las estaciones del VNR y determinar su comportamiento volcánico. La componente vertical de las estaciones registró inflación desde 2014 hasta principios de 2018.

**Palabras clave:** Nevado del Ruiz, deformación, procesamiento en línea, servidor CSRS, series de tiempo.

## **Abstract**

The Nevado del Ruiz Volcano (VNR) is located in the Central Cordillera of Colombia and is currently the most active volcano in the country monitored since 1985 by the Colombian Geological Survey - Volcanological and Seismological Observatory of Manizales (SGC - OVSM).

The study of the deformation of the VNR began in 1985. In 2007 electronic tiltmeters were installed and only until 2010, the installation of permanent GNSS stations began, establishing until 2021 a network of 30 stations to monitor the deformation of the VNR and the volcanoes of the Northern Volcanic Segment of Colombia (SVNC).

This work continued the support of geology students from the University of Caldas to the geodesy area of the SGC - OVSM, through the processing of data from the VNR GNSS stations through the Canadian Space Reference System (CSRS). This support allowed the SGC - OVSM to carry out the monitoring of the VNR deformation in quasi real time, that is, processing the GNSS data of the previous day with ultra-fast and fast orbits, as well as processing the GNSS data with an average delay of 20 days using final orbits and obtaining high precision. Time series were generated with the tectonic behavior of the VNR GNSS stations that allowed the tectonic velocity to be determined. Three VCM GNSS stations were used to remove the tectonic effect of the VNR stations and determine their volcanic behavior. The vertical component of the stations registered inflation from 2014 to the beginning of 2018.

**Keywords:** Nevado del Ruiz, deformation, online processing, CSRS server, time series.

## Tabla de Contenido

	Pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
<b>3. LOCALIZACIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>4. MARCO GEOLÓGICO .....</b>	<b>6</b>
4.1 UNIDADES GEOLÓGICAS .....	8
4.1.1 <i>Paleozoico</i> .....	9
4.1.2 <i>Mesozoico</i> .....	10
4.1.3 <i>Cenozoico</i> .....	11
<b>5. MARCO ESTRUCTURAL .....</b>	<b>14</b>
<b>6. ANTECEDENTES.....</b>	<b>20</b>
<b>7. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>24</b>
7.1 GNSS.....	24
7.2 ESTACIONES GNSS .....	27
7.2.1 <i>Receptor GNSS</i> .....	28
7.2.2 <i>Antena GNSS</i> .....	29
7.3 BASES DE DATOS .....	30
7.4 RED GEODÉSICA DEL VNR.....	31
7.5 CONSTRUCCIÓN DE ESTACIONES GNSS.....	32
7.5.1 <i>Materialización del Monumento de la Antena GNSS</i> .....	32
7.5.2 <i>Montaje e Instalación de la Antena GNSS</i> .....	38
7.5.3 <i>Gabinete para Protección de Equipos</i> .....	42
7.5.4 <i>Instalación del Sistema de Protección contra Descargas Eléctricas</i> .....	44
7.6 BASE DE DATOS GNSS .....	46
7.7 TRANSMISIÓN DE DATOS .....	46
7.8 SERIES DE TIEMPO .....	48
7.9 CORRELACIÓN ESTADÍSTICA.....	49

	<b>Pág.</b>
<b>8. METODOLOGÍA .....</b>	<b>50</b>
8.1 CONVERSIÓN DATOS GNSS.....	50
8.2 SISTEMA DE REFERENCIA ESPACIAL CANADIENSE (CSRS).....	54
8.3 PROCESAMIENTO DATOS GNSS.....	55
8.4 ALIMENTACIÓN BASES DE DATOS GNSS .....	62
8.5 GENERACIÓN SERIES DE TIEMPO DEL VNR CON INFLUENCIA TECTÓNICA.....	67
8.6 CORRELACIÓN ENTRE ESTACIONES GNSS .....	70
8.7 CORRECCIÓN TECTÓNICA DE LOS DATOS GNSS .....	74
<b>9. RESULTADOS .....</b>	<b>79</b>
9.1 ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS.....	79
9.1.1 Estación BISO con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas.....	79
9.1.2 Estación GUAL con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas.....	81
9.1.3 Estación INDE con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas.....	83
9.1.4 Estación RUBI con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas.....	85
9.1.5 Estación PIRA con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas.....	87
9.1.6 Estación BLLR con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas.....	89
9.1.7 Estación RECM con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas.....	91
9.1.8 Estación SINN con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas.....	93
9.1.9 Estación NERE con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas .....	95
9.1.10 Estación OLLE con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas.....	97
9.2 ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO ORBITAS FINALES.....	99
9.2.1 Estación BISO con Procesamiento Orbitas Finales.....	99
9.2.2 Estación GUAL con Procesamiento Orbitas Finales.....	101
9.2.3 Estación INDE con Procesamiento Orbitas Finales .....	103
9.2.4 Estación RUBI con Procesamiento Orbitas Finales.....	105
9.2.5 Estación PIRA con Procesamiento Orbitas Finales.....	107
9.2.6 Estación BLLR con Procesamiento Orbitas Finales.....	109
9.2.7 Estación RECM con Procesamiento Orbitas Finales.....	111
9.2.8 Estación SINN con Procesamiento Orbitas Finales.....	113
9.2.9 Estación NERE con Procesamiento Orbitas Finales.....	115
9.2.10 Estación OLLE con Procesamiento Orbitas Finales .....	117

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
<b>10. CONCLUSIONES .....</b>	<b>119</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>122</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>129</b>

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>FIGURA 1.</b> FOTOGRAFÍA AÉREA DEL VNR TOMADA POR MILTON ORDÓÑEZ DESDE EL NORTE EN 2007, MEDIANTE SOBREVUELO REALIZADO POR EL SGC – OVSM CON APOYO DEL A FUERZA AÉREA COLOMBIANA (FAC). ABAJO: CABECERA RÍO AZUFRADO; CENTRO: CASQUETE GLACIAL Y CRÁTER ARENAS CON EMISIÓN DE VAPOR DE AGUA Y GASES; FONDO IZQUIERDA A DERECHA: VOLCÁN NEVADO DEL TOLIMA, VOLCÁN PARAMILLO DEL QUINDIO, VOLCÁN NEVADO DEL SANTA ISABLE Y VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA.....	4
<b>FIGURA 2.</b> MAPA DE LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO. A: MAPA DE COLOMBIA; B: MODELO 3D DEL VNR; C: ÁREA DE INFLUENCIA DEL VNR MONTANDO SOBRE IMAGEN LANDSAT, MOSTRANDO EL CASQUETE GLACIAR, EL CRÁTER ARENAS (LÍNEA ROJA) Y LAS VÍAS DE ACCESO.....	5
<b>FIGURA 3.</b> MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO (GONZALES, 2001).....	9
<b>FIGURA 4.</b> MAPA DE FALLAS ACTIVAS DEL VNR (MODIFICADO DE CEBALLOS ET AL., 2020) MONTADO SOBRE DEM DE 90 M DE LA NASA (JARVIS, ET AL., 2008; <a href="https://cgiasci.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1">HTTPS://CGIARCSI.COMMUNITY/DATA/SRTM-90M-DIGITAL-ELEVATION-DATABASE-V4-1</a> ).....	19
<b>FIGURA 5.</b> SEGMENTOS DEL SISTEMA DE SATÉLITES.....	25
<b>FIGURA 6.</b> REPRESENTACIÓN DE LA TRIANGULACIÓN PARA ESTABLECER LA POSICIÓN DE UN RECEPTOR.....	26
<b>FIGURA 7.</b> RECEPTOR GNSS, MARCA TRIMBLE, MODELO NETR9.....	29
<b>FIGURA 8.</b> ANTENAS GNSS MARCA TRIMBLE, MODELOS CHOKER RING Y ZEPHYR GEODETIC 2.....	30
<b>FIGURA 9.</b> MAPA CON LA LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES GNSS DE LA RED GEODÉSICA DEL VNR.....	32
<b>FIGURA 10.</b> FOTOGRAFÍAS QUE ILUSTRAN EL PROCESO DE PERFORACIÓN DE LA ROCA EMPLEANDO EL TALADRO PERCUTOR (ORDÓÑEZ, 2018).....	33
<b>FIGURA 11.</b> FOTOGRAFÍAS QUE ILUSTRAN LAS PERFORACIONES REALIZADAS EN LA ROCA (ORDÓÑEZ, 2018).....	34
<b>FIGURA 12.</b> FOTOGRAFÍA QUE ILUSTRAN LA ESTRUCTURA DE HIERRO (ORDÓÑEZ, 2018).....	34
<b>FIGURA 13.</b> FOTOGRAFÍAS QUE ILUSTRAN EL CEMENTADO DE LA VARILLA DE ACERO INOXIDABLE Y LA ESTRUCTURA DE HIERRO (ORDÓÑEZ, 2018).....	35
<b>FIGURA 14.</b> FOTOGRAFÍAS QUE ILUSTRAN EL PROCESO DE ACOPLE DEL CABLE DE COBRE PARA LA CONEXIÓN AL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS (ORDÓÑEZ, 2018).....	36
<b>FIGURA 15.</b> FOTOGRAFÍAS QUE ILUSTRAN EL PROCESO DE NIVELACIÓN DE LA VARILLA DE ACERO INOXIDABLE (ORDÓÑEZ, 2018).....	36
<b>FIGURA 16.</b> FOTOGRAFÍAS DEL MONTAJE DE LA FORMAleta PVC Y DE LA MANGUERA PARA PROTECCIÓN DEL CABLE DE CONEXIÓN ENTRE LA ANTENA GNSS Y EL RECEPTOR GNSS (ORDÓÑEZ, 2018).....	37
<b>FIGURA 17.</b> FOTOGRAFÍAS DE LA FUNDICIÓN DEL MOJÓN DE CONCRETO Y LA DISPOSICIÓN FINAL DE LA VARILLA PARA EL ACOPLE DE LA ANTENA GNSS (ORDÓÑEZ, 2018).....	38
<b>FIGURA 18.</b> FOTOGRAFÍAS DE LA VARILLA DE ACERO INOXIDABLE Y EL DISPOSITIVO ROSCADO (ORDÓÑEZ, 2018).....	39

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>FIGURA 19.</b> FOTOGRAFÍAS DE LA BASE NIVELANTE DE ACERO INOXIDABLE. VISTA EN PLANTA (A) Y PERFIL (B) (ORDÓÑEZ, 2018). .....	39
<b>FIGURA 20.</b> FOTOGRAFÍAS DE LA NIVELACIÓN DE LA BASE DE ACERO INOXIDABLE PARA MONTAJE DE LA ANTENA GNSS (ORDÓÑEZ, 2018). .....	40
<b>FIGURA 21.</b> FOTOGRAFÍAS DEL PROCESO DE MONTAJE Y ORIENTACIÓN DE LA ANTENA GNSS (ORDÓÑEZ, 2018).....	40
<b>FIGURA 22.</b> FOTOGRAFÍAS DE LA CONEXIÓN DEL CABLE A LA ANTENA GNSS Y LA PROTECCIÓN DE LA MANGUERA (ORDÓÑEZ, 2018). .....	41
<b>FIGURA 23.</b> FOTOGRAFÍA DEL MOJÓN DE CONCRETO DE LA ESTACIÓN GNSS (ORDÓÑEZ, 2018).....	41
<b>FIGURA 24.</b> FOTOGRAFÍAS DEL GABINETE DE PROTECCIÓN DE EQUIPOS Y LOS PANELES SOLARES DE LA ESTACIÓN GNSS (ORDÓÑEZ, 2018). .....	42
<b>FIGURA 25.</b> FOTOGRAFÍAS QUE ILUSTRAN EL GABINETE CON DOS BATERÍAS, UN SISTEMA DE BRAKERS, UN POLIFAZER, UN ANCLAJE DE TIERRAS, UN REGULADOR DE VOLTAJE, UN RADIO TRANSMISOR Y EL RECEPTOR GNSS (ORDÓÑEZ, 2018). .....	43
<b>FIGURA 26.</b> FOTOGRAFÍAS QUE ILUSTRAN LA CAJA DE PROTECCIÓN DEL RECEPTOR GNSS, EN LA CUAL ADICIONALMENTE SE INSTALÓ EL RADIO DE COMUNICACIONES Y UNA TARJETA DE AUTOENCENDIDO (ORDÓÑEZ, 2018).....	43
<b>FIGURA 27.</b> FOTOGRAFÍAS QUE ILUSTRAN LA CONEXIÓN DEL CABLE DE COBRE A LA VARILLA DE ACERO INOXIDABLE Y LA DISPOSICIÓN DEL MOJÓN DE CONCRETO (ORDÓÑEZ, 2018). .....	45
<b>FIGURA 28.</b> FOTOGRAFÍAS QUE ILUSTRAN LA CONEXIÓN DEL CABLE DE COBRE ENTRE LA ANTENA Y EL GABINETE (ORDÓÑEZ, 2018). .....	45
<b>FIGURA 29.</b> ARCHIVOS GNSS EN FORAMTO T02 USADOS CON EL PROGRAMA CONVERT TO RINEX UTILITY.....	52
<b>FIGURA 30.</b> PROGRAMA CONVERT TO RINEX EMPLEADO POR EL SGC - OVSM. ....	53
<b>FIGURA 31.</b> ARCHIVOS GNSS EN FORMATO RINEX (OBSERVABLES) LUEGO DE SER PROCESADOS CON EL PROGRAMA CONVERT TO RINEX. ....	54
<b>FIGURA 32.</b> PAGINA DEL CSRS PPP.....	57
<b>FIGURA 33.</b> INGRESO A LA PLATAFORMA CON LA CUENTA CREADA EN EL CSRS PPP.....	58
<b>FIGURA 34.</b> ARCHIVO RINEX COMPRIMIDO EN FORMATO .ZIP PARA SER CARCADO EN EL CSRS PPP.....	58
<b>FIGURA 35.</b> PÁGINA DE LA HERRAMIENTA DE POSTPROCESAMIENTO DEL CSRS PPP DONDE SE CARGAN LOS ARCHIVOS GNSS EN FORMATO .ZIP, EN EL MODO DE PROCESAMIENTO ESTATICO Y BAJO EL MARCO DE REFERENCIA ITRF. ...	59
<b>FIGURA 36.</b> INFORMACION QUE LLEGA AL CORREO ASOCIADO DESDE DONDE SE PUEDE DESCARGAR LAS SOLUCIONES EN ORBITAS FINALES, RÁPIDAS Y ULTRA-RÁPIDAS.....	60
<b>FIGURA 37.</b> PRIMERA PÁGINA DEL REPORTE DE SOLUCIONES DEL CSRS PPP DEL CUAL SE EXTRAEN LAS COORDENADAS NORTE, ESTE Y LA ALTURA.. .....	61

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>FIGURA 38.</b> INFORMACIÓN CONTENIDA DENTRO DEL PDF OBTENIDO A TRAVÉS DEL CSRS PPP, DEL CUAL SE EXTRAE LA INFORMACIÓN MARCADA POR LOS RECUADROS DE COLOR ROJO.....	62
<b>FIGURA 39.</b> ARCHIVOS EXCEL EN LOS CUALES SE ORGANIZAN Y ALMACENAN LOS DATOS PARA CADA ESTACIÓN GNSS. A LA IZQUIERDA SE MUESTRAN LOS ARCHIVOS PROCESADOS CON ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS, Y A LA DERECHA LOS ARCHIVOS POST-PROCESADOS CON LAS ORBITAS FINALES QUE TIENEN UN RETRAZO PROMEDIO DE 20 DÍAS, TANTO PARA LOS ARCHIVOS TECTÓNICOS COMO PARA LOS ARCHIVOS VOLCÁNICOS.....	64
<b>FIGURA 40.</b> A: ESTRUCTURA GENERAL DONDE SE ALMACENAN EN CARPETAS LOS ARCHIVOS GNSS POR CÓDIGO DE LA ESTACIÓN. B: INFORMACIÓN ALMACENADA DENTRO DE LA CARPETA BISO. C: ARCHIVOS ALMACENADOS DENTRO DE LAS CARPETA CORRESPONDIENTE A SU AÑO DE ADQUISICIÓN. D: INFORMACIÓN ALMACENADA DENTRO DE LA CARPETA POSTPROCESAMIENTO CORRESPONDIENTE A TODOS LOS DATOS OBTENIDOS EN ORBITAS FINALES.	65
<b>FIGURA 41.</b> FORMATO UTILIZADO EN LA HOJA DE CÁLCULO PARA LOS DATOS OBTENIDOS MEDIANTE ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS.....	66
<b>FIGURA 42.</b> FORMATO UTILIZADO EN LA HOJA DE CÁLCULO PARA LOS DATOS OBTENIDOS MEDIANTE ORBITAS FINALES SIN CORRECCIÓN TECTÓNICA.....	66
<b>FIGURA 43.</b> FORMATO UTILIZADO EN LA HOJA DE CÁLCULO PARA LOS DATOS OBTENIDOS MEDIANTE ORBITAS FINALES CORREGIDOS TECTÓNICAMENTE PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO.....	67
<b>FIGURA 44.</b> EL RECUADRO ROJO MUESTRA LA ECUACIÓN PARA OBTENER LAS DIFERENCIAS ( $di$ ) DE CADA ESTACIÓN GNSS.....	69
<b>FIGURA 45.</b> SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACION GNSS BISO PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO MEDIANTE ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS. SE EVIDENCIA CLARAMENTE EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO DEL BLOQUE DONDE ESTA CONSTRUIDA LA ESTACIÓN CON DIRECCION NNE.....	70
<b>FIGURA 46.</b> FUNCIÓN PARA CALCULAR LA PENDIENTE DE LA CORRELACIÓN ENTRE LAS ESTACIONES GNSS BISO Y SECR. ....	72
<b>FIGURA 47.</b> FUNCIÓN PARA CALCULAR LA INTERSECCIÓN CON EL EJE Y DE LA CORRELACIÓN ENTRE LAS ESTACIONES GNSS BISO Y SECR.....	72
<b>FIGURA 48.</b> SERIE DE TIEMPO DE LA DISPERSIÓN OBTENIDA MEDIANTE EL CRUCE DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE (COMPONENTE NORTE DE LA ESTACIÓN SECR) CON LA VARIABLE DEPENDIENTE (COMPONENTE NORTE DE LA ESTACIÓN BISO). LA LÍNEA DE COLOR NEGRO REPRESENTA LA LÍNEA DE TENDENCIA PARA LA ECUACIÓN DE LA RECTA Y SU PORCENTAJE DE CORRELACIÓN $R^2$ . PARA ESTA CORRELACIÓN EL $R^2$ ES 0.9853 QUE CORRESPONDE A UN PORCENTAJE POSITIVO DE 98.53 % QUE INDICA QUE LAS DOS VARIABLES SON ALTAMENTE PARECIDAS.....	73

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>FIGURA 49.</b> PENDIENTE E INTERSECCIÓN OBTENIDOS POR MEDIO DE LAS FUNCIONES MATEMÁTICAS EN LA HOJA DE CÁLCULO PARA LAS ESTACIONES GNSS BISO Y SECR. ....	74
<b>FIGURA 50.</b> UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL VCM Y DE LAS ESTACIONES GNSS DE REFERENCIA LAGU, MRAL, SECR. IMAGEN SATELITAL TOMADA Y MODIFICADA DEL SATÉLITE DE GOOGLE EARTH. ....	75
<b>FIGURA 51.</b> FORMATO USADO EN LA HOJA DE CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS DATOS CORREGIDOS DEL EFECTO TECTÓNICO PARA LA ESTACIÓN GNSS BISO. EL RECUADRO DE COLOR ROJO MUESTRA LA FÓRMULA UTILIZADA....	77
<b>FIGURA 52.</b> SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS BISO PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO MEDIANTE ORBITAS FINALES, UTILIZANDO LA ESTACIÓN GNSS DE REFERENCIA SECR DE LA RED DE DEFORMACIÓN DEL VCM. ....	78
<b>FIGURA 53.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS BISO PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS BISO CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN BISO Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN BISO Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN BISO Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. ....	80
<b>FIGURA 54.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS GUAL PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS GUAL CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN GUAL Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN GUAL Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN GUAL Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. ....	82
<b>FIGURA 55.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS INDE PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS INDE CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN INDE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN INDE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN INDE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. ....	84

## Lista de Figuras

	Pág.
<b>FIGURA 56.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS RUBI PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS RUBI CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN RUBI Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN RUBI Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN RUBI Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR.....	86
<b>FIGURA 57.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS PIRA PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS PIRA CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN PIRA Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN PIRA Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN PIRA Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. ....	88
<b>FIGURA 58.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS BLLR PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS BLLR CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN BLLR Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN BLLR Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN BLLR Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU.....	90
<b>FIGURA 59.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS RECM PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS RECM CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN RECM Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN RECM Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN RECM Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. ....	92

## Lista de Figuras

	Pág.
<b>FIGURA 60.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS SINN PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS SINN CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN SINN Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN SINN Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN SINN Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. ....	94
<b>FIGURA 61.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS NERE PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS NERE CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN NERE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN NERE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN NERE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU.....	96
<b>FIGURA 62.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS OLLE PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS ULTRA-RÁPIDAS Y RÁPIDAS MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS OLLE CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN OLLE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN OLLE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN OLLE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. ....	98
<b>FIGURA 63.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS BISO PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS FINALES MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS BISO CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN BISO Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN BISO Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN BISO Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL.....	100

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>FIGURA 64.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS GUAL PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS FINALES MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS GUAL CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN GUAL Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN GUAL Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN GUAL Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. ....	102
<b>FIGURA 65.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS INDE PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS FINALES MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS INDE CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN INDE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN INDE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN INDE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR.....	104
<b>FIGURA 66.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS RUBI PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS FINALES MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS RUBI CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN RUBI Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN RUBI Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN RUBI Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. ....	106
<b>FIGURA 67.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS PIRA PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS FINALES MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS PIRA CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN PIRA Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN PIRA Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN PIRA Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. ....	108

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>FIGURA 68.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS BLLR PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS FINALES MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS BLLR CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN BLLR Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN BLLR Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN BLLR Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. ....	110
<b>FIGURA 69.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS RECM PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS FINALES MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS RECM CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN RECM Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN RECM Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN RECM Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. ....	112
<b>FIGURA 70.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS SINN PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS FINALES MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS SINN CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN SINN Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN SINN Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN SINN Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. ....	114
<b>FIGURA 71.</b> A: SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS NERE PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS FINALES MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. B: SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS NERE CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. C: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN NERE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. D: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN NERE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR. E: CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN NERE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA SECR.....	116

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>FIGURA 72. A:</b> SERIE DE TIEMPO DE LA ESTACIÓN GNSS OLLE PARA LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (VERDE) Y ALTURA (ROJO) OBTENIDA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO CON ORBITAS FINALES MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TECTÓNICO. <b>B:</b> SERIE DE TIEMPO PARA LA ESTACIÓN GNSS OLLE CON LA CORRECCIÓN A PARTIR DE LA ESTACIÓN DE REFERENCIA LAGU, MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO VOLCÁNICO. <b>C:</b> CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ESTE ENTRE LA ESTACIÓN OLLE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. <b>D:</b> CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE NORTE ENTRE LA ESTACIÓN OLLE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL. <b>E:</b> CORRELACIÓN PARA LA COMPONENTE ALTURA ENTRE LA ESTACIÓN OLLE Y LA ESTACIÓN DE REFERENCIA MRAL.	118

## Lista de Tablas

**Pág.**

<b>TABLA 1.</b> PRINCIPALES GRUPOS DE ESTRUCTURAS DEL ÁREA DE ESTUDIO. MODIFICADO DE BOHÓRQUEZ ET AL. (2005). .....	15
<b>TABLA 2.</b> ESTACIONES GNSS DE LA RED GEODÉSICA DEL VNR. SE INDICA LA DISTANCIA AL CRÁTER, EL FLANCO DONDE SE UBICAN LAS ESTACIONES Y LA FECHA DE INSTALACIÓN. ....	31

## 1. Introducción

El Volcán Nevado del Ruiz (VNR) está ubicado en la Cordillera Central de Colombia (Latitud 4.982 N, longitud 75.319 W, elevación 5321 m.s.n.m.). El VNR es considerado uno de los volcanes más activos del país y es monitoreado desde 1985 por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) a través del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (OVSM) (Ordóñez et al., 2015).

El monitoreo permanente del VNR fue iniciado por el SGC - OVSM en 1985 y desde entonces se han reportado cinco eventos eruptivos, el 11 de septiembre de 1985, el 13 de noviembre de 1985, el 1 de septiembre de 1989, el 29 de mayo de 2012 y el 30 de junio de 2012. Desde 1985 y hasta 2021 se han registrado un sinnúmero de pequeñas explosiones y emisiones de gases y ceniza. La mayoría de las erupciones, explosiones y emisiones han producido pequeños depósitos de material piroclástico y generación de pequeños lahares restringidos a la parte proximal del volcán. Solo la erupción del 13 de noviembre de 1985 produjo el depósito de gran cantidad de material piroclástico y la generación de lahares de grandes volúmenes muy destructivos. El VNR es monitoreado desde 1985 por el SGC a través del OVSM que emplea la sismología, la geodesia y la geoquímica para hacer su estudio y seguimiento.

El estudio de la deformación del VNR se inició en octubre de 1985 con la construcción de cuatro inclinómetros secos y la instalación de dos inclinómetros electrónicos. Después de la erupción del 13 de noviembre de 1985, se hicieron muchos esfuerzos para ampliar la red de deformación logrando una red conformada por cuatro inclinómetros electrónicos, 11 inclinómetros secos, cinco líneas de nivelación, ocho bases EDM y 38 reflectores EDM. Desafortunadamente los cuatro inclinómetros electrónicos no operaron correctamente y fueron desmontados en 1986, al igual que la red EDM que fue ocupada hasta ese año. Las

estaciones de control topográfico fueron ocupadas periódicamente hasta 2006. En 2007, se inició la instalación de dos inclinómetros electrónicos y anualmente se fue ampliando la cobertura hasta tener una red conformada por 11 inclinómetros que operan hasta 2021. En 2007 también se inició la construcción de una nueva red de EDM que fue ocupada periódicamente hasta 2012, cuando se dejó de ocupar por el incremento en la actividad del volcán y la constante caída de ceniza que impedía realizar las mediciones EDM. A partir de 2011, se inició la instalación de estaciones GNSS permanentes, construyendo una red de diez estaciones que opera hasta 2020 (Ordóñez et al., 2021B).

En este trabajo se presenta el manejo, procesamiento y análisis de los datos GNSS de la red geodésica del VNR mediante el uso de la plataforma en línea CSRS de Canadá. El proceso inicia con la preparación de los datos de las estaciones GNSS de la red de monitoreo geodésico del VNR, conversión de formato nativo a formato universal RINEX, carga y procesamiento de archivos en el servidor CSRS en línea, descarga de archivos diarios con las coordenadas y soluciones en formato PDF, generación de bases de datos en formato Excel, post-procesamiento de los datos para generar y filtrar series de tiempo que permiten analizar y evaluar el comportamiento deformativo del VNR. El análisis de las mediciones de deformación del VNR se realizó para el periodo 2012 – 2021 para las estaciones GNSS.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Apoyar el procesamiento de datos GNSS a través de servidores en línea del Sistema de Referencia Espacial Canadiense (SRSC) para monitorear la deformación del Volcán Nevado de Ruiz.

### **2.2 Objetivos Específicos**

2.2.1 Revisar la base de datos GNSS.

2.2.2 Convertir los datos GNSS de formato nativo a formato universal Rinex.

2.2.3 Procesar en línea los datos GNSS en el servidor del CSRS.

2.2.4 Actualizar las bases de datos GNSS en formato Excel.

2.2.5 Generar y filtrar series de tiempo de las estaciones GNSS del VNR.

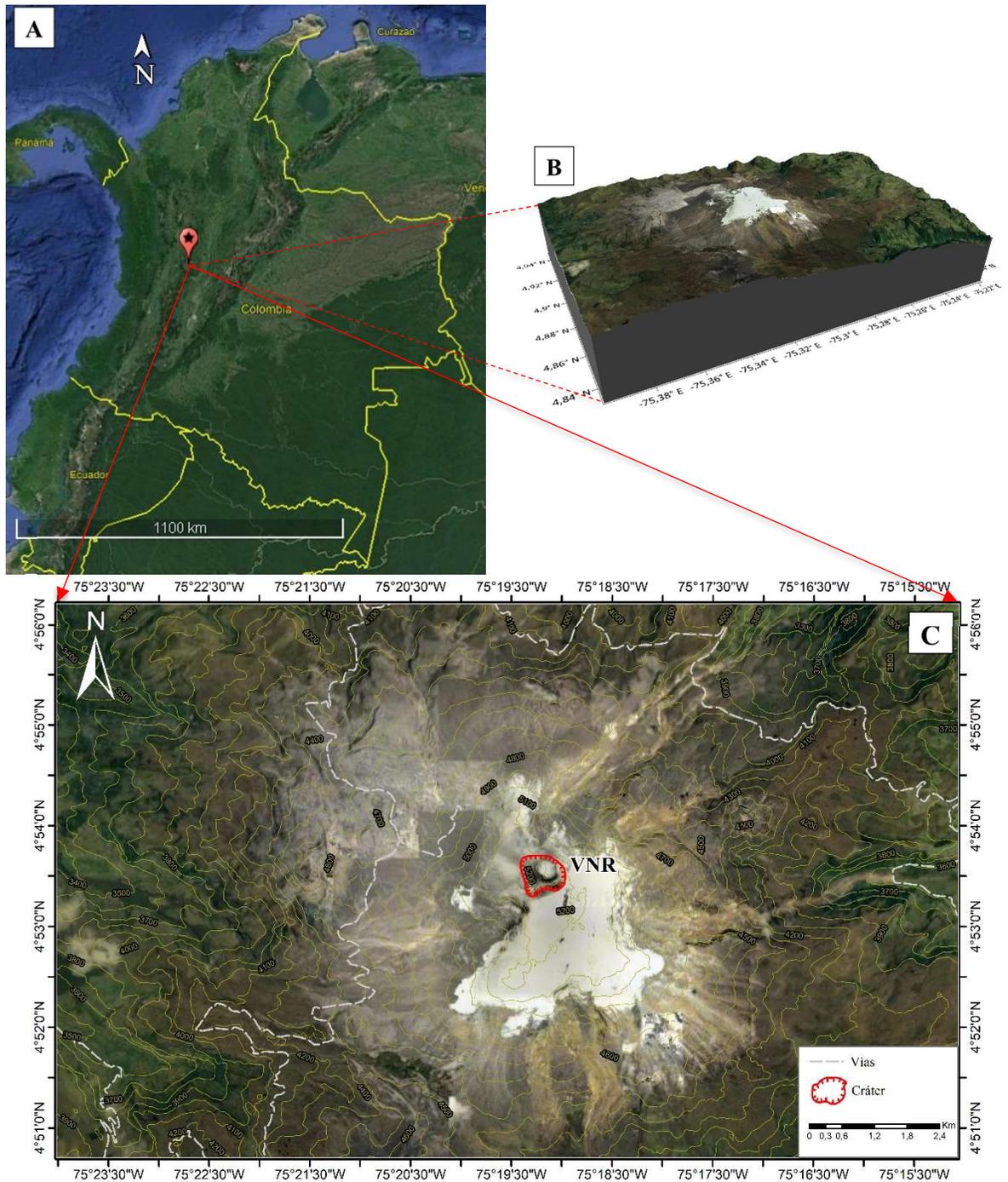
2.2.6 Analizar y evaluar el comportamiento de las estaciones GNSS y definir procesos deformativos.

### 3. Localización

El VNR se localiza en la Cordillera Central de Colombia, en el límite de los departamentos de Caldas y Tolima, en las coordenadas 4°53'34.23" latitud Norte, 75°19'07.56" longitud Oeste y tiene una altura de 5321 m.s.n.m. (Figura 1 y Figura 2).



**Figura 1.** Fotografía aérea del VNR tomada por Milton Ordóñez desde el Norte en 2007, mediante sobrevuelo realizado por el SGC – OVSM con apoyo del a Fuerza Aérea Colombiana (FAC). Abajo: cabecera Río Azufrado; centro: casquete glacial y Cráter Arenas con emisión de vapor de agua y gases; fondo izquierda a derecha: Volcán Nevado del Tolima, Volcán Paramillo del Quindio, Volcán Nevado del Santa Isable y Volcán Paramillo de Santa Rosa.



**Figura 2.** Mapa de localización del área de estudio. A: mapa de Colombia; B: modelo 3D del VNR; C: área de influencia del VNR montando sobre imagen Landsat, mostrando el casquete glaciar, el Cráter Arenas (línea roja) y las vías de acceso.

#### 4. Marco Geológico

El Complejo Volcánico Nevado del Ruiz (CVNR) hace parte del SVNC, un grupo de 11 volcanes alineados N-S y extendidos por 137 km a lo largo de la Cordillera Central de Colombia (Ceballos et al., 2020). El VNR hace parte del CVNR, es un estratovolcán andesítico-dacítico de 5321 m de Altura y es considerado uno de los volcanes más activos de Colombia. El VNR posee un sistema hidrotermal considerable deducido de las numerosas fuentes termales que se encuentran en sus alrededores (González et al., 2015).

El VNR se ubica en los límites de los departamentos de Caldas y Tolima, aproximadamente a 140 km al NO de Bogotá y 28 km al SE de Manizales. El 13 de noviembre de 1985, el material piroclástico producido por una modesta erupción (VEI entre 2 y 3) del VNR provocó el repentino derretimiento del casquete glaciar y la formación de un lahar que alcanzó y destruyó la ciudad de Armero y algunos barrios de la ciudad de Chinchiná, causando 25.000 muertos (Pierson et al., 1990). Debido a la amenaza que representa el VNR, al registro histórico de sus erupciones que a pesar de ser pequeñas han desatado grandes desastres, el estudio de este volcán utilizando integración de datos sismológicos, de deformación y del sistema tectónico, tiene un valor considerable para comprender los procesos físicos que controlan su comportamiento y hacer un mejor diagnóstico de su estado de actividad. Además, esta información es esencial para servir a las comunidades alrededor del volcán en la gestión exitosa del riesgo volcánico.

El VNR es un volcán compuesto de composición andesítica cubierto por un glaciar y conformado por una compleja geología de rocas ígneas, metamórficas, sedimentarias y volcano-sedimentarias. Su geometría es cónica aplanada en la parte superior, con un diámetro mayor en su base de 15 km de longitud. El VNR es el resultado del vulcanismo de la Cordillera de los Andes originado por un margen continental activo que involucra a las placas

Suramericana, Caribe, Nazca y las microplacas de Coiba y Panamá (Taboada et al., 2000; Bohórquez et al, 2005). El VNR hace parte del CVNR que tiene una edad de 1.8 millones de años. El CVNR posee 3 edificios volcánicos superpuestos (PRE-Ruiz, VNR-PER y VNR-SER), 3 volcanes menores predominantemente efusivos, y al menos 8 domos de lava y un cráter fisural. El CVNR ha producido en el pasado productos efusivos (coladas y domos de lava), depósitos piroclásticos relacionados con el colapso de columnas eruptivas, caídas piroclásticas, corrientes de densidad piroclásticas, flujos de bloques y cenizas, avalanchas de escombros y múltiples depósitos de lahar (Ceballos et al., 2020).

La historia eruptiva del CVNR fue subdividida en 4 periodos por Ceballos et al. (2020): periodo uno o “Periodo Erupción PRE-Ruiz”, desde 1,80 Ma hasta 0,97 Ma con actividad predominantemente efusiva; período dos o “Primer Período de Erupción del Ruiz”, desde 0.97 Ma hasta 0,2 Ma. Este periodo comenzó con una erupción constructiva, seguida de una erupción destructiva que terminó con la evacuación de material, el colapso posterior del techo del reservorio magmático principal y la formación de una gran caldera; periodo tres o “Periodo Intermedio de Erupción del Ruiz” que corresponde a la formación de domos de lava resurgentes y centros de erupción menores localizados cerca de la caldera; y periodo cuatro o “Segundo Periodo de Erupción del Ruiz” que posiblemente se inició cerca del periodo Pleniglacial de la Última Glaciación y continuó hasta el presente. En ese mismo trabajo, el período cuatro se subdividió en cinco épocas eruptivas, entre las cuales, sólo la primera fue constructiva y relacionada con erupciones efusivas, mientras que las siguientes épocas estuvieron dominadas por actividad explosiva.

La morfología de la cima del CVNR, del VNR y de su principal cráter activo denominado Arenas es consecuencia de la compleja interacción entre los procesos volcánicos efusivos y explosivos, la distribución de los depósitos volcánicos, la erosión provocada por el calentamiento global y la dinámica de la cubierta glaciaria. La morfología actual del cráter Arenas, las terrazas menores dentro del cráter, los diversos focos de emisión de cenizas y las

zonas de actividad fumarólica se formaron probablemente por la actividad posterior a las erupciones de 1845, 1985, 1989, 2012 y la inestabilidad volcánica de los últimos años (Ordóñez et al., 2021A). La morfología actual del cráter Arenas es el resultado de las afectaciones producidas por las erupciones de los últimos 174 años, que permitieron la formación de terrazas menores dentro del cráter. Los focos de emisión de ceniza y las zonas de actividad fumarólica actuales se mantienen activas desde las erupciones de 1985 y 1989. El cráter posee un diámetro aproximado de entre 930 a 980 m y una profundidad de 300 m. El VNR posee un posible conducto de aproximadamente 200 m de diámetro, ubicado justo en el centro y el fondo del cráter. En el fondo y el centro del cráter existen dos focos fumarólicos mayores y activos con permanente emisión de vapor de agua, dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y cenizas, así como varias fumarolas ubicadas siguiendo el contorno y cima del conducto. La morfología dentro del cráter Arenas se mantuvo más o menos igual hasta 2015, cuando se emplazó un nuevo domo de lava en el fondo del cráter durante un nuevo período de reactivación del volcán caracterizado por un aumento notable de la sismicidad, la deformación y las emisiones de gases y cenizas desde 2012 hasta el presente (2020) (Ordóñez et al., 2021A).

#### **4.1 Unidades Geológicas**

Las principales unidades ígneas y metamórficas presentes en el área son: el Complejo Cajamarca que constituye el núcleo de la Cordillera Central (González, 1993), el Complejo Quebradagrande (Maya y González, 1995) localizado al occidente de la Zona de Falla de San Jerónimo, la Milonita Granítica del Guacaica (Cuéllar et al., 2003), el Batolito del Bosque (Barrero y Vesga, 1976) y la Tonalita - Granodiorita de Manizales (López y Aguirre, 2005) o Stock Tonalítico-Granodiorítico de Manizales (Plazas, 2010). Sobre estas unidades, discordantemente, se encuentran depósitos piroclásticos, flujos de lava y depósitos de ceniza pertenecientes principalmente a los volcanes Cerro Bravo, Nevado del Ruiz, Nevado de Santa Isabel y Paramillo de Santa Rosa.

El basamento de la estructura volcánica del VNR está constituido por rocas metamórficas triásicas del Complejo Cajamarca, rocas volcanoclásticas cretácicas del Complejo Quebradagrande, rocas miloníticas cretácicas del Guacaica y unidades ígneas del Stock de Manizales y del Batolito de El Bosque (Cuellar et al., 2003; Villagómez et al., 2011; Villagómez y Spikings, 2013; Gómez et al., 2015; González-García y Jessell, 2016). Esta información se encuentra representada en la Figura 3.

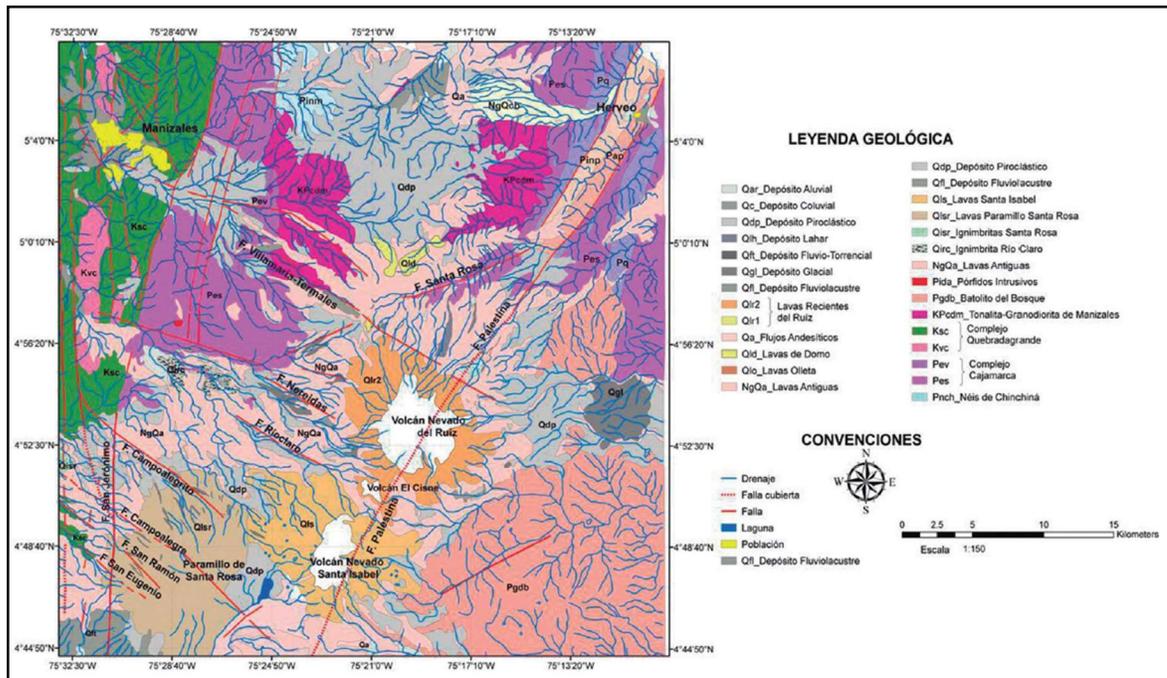


Figura 3. Mapa Geológico de la zona de estudio (Gonzales, 2001).

## 4.1.1 Paleozoico

### 4.1.1.1 Complejo Cajamarca (Pes, Pq, Pev):

Está compuesto por rocas metamórficas de bajo a medio grado como filitas, esquistos verdes, cuarcitas mármoles (González y Maya, 1995), con facies que van desde esquistos verdes a anfibolitas y conforman el núcleo de la cordillera central (Gonzales, 1993). Las edades de las rocas van desde el paleozoico hasta el cretácico. La unidad se encuentra limitada al oriente por la falla Otún-Pericos, y al occidente por la falla San Jerónimo que la separa de rocas de

volcánicas de afinidad marina del Complejo Quebradagrande. Localmente esta unidad aflora al Noreste y al Norte del VNR y se encuentran rocas como esquistos verdes y negros, cuarcitas y anfíbolitas. Se encuentra parcialmente cubierto por lavas antiguas, el Lahar de Herveo y se encuentra intruído por el Stock de Manizales en el sector noroccidental.

#### **4.1.1.2 Gnéis de Manizales (Pinn):**

Es denominado por Mosquera (1978) como intrusivo néisico de Manizales y corresponde a un cuerpo localizado al NE de Manizales, con 50 km de extensión, 3.5 km de ancho máximo y morfológicamente alargado en sentido N-S. Intruye rocas del Complejo Cajamarca al occidente y es intruído al Norte y sur por el Stock de Manizales.

### **4.1.2 Mesozoico**

#### **4.1.2.1 EL Complejo Quebradagrande (Ksc-Kvc):**

Es denominado por Moreno y Pardo (2003) como Complejo Quebradagrande-Alao y corresponde a un conjunto de rocas compuesto por una suite ofiolítica de rocas ultramáficas, gabros, basaltos, lodolitas, cherts, areniscas feldespáticas, conglomerados, brechas y rocas piroclásticas usualmente afectadas por metamorfismo dinámico. Conjunto de rocas volcánicas y sedimentarias de afinidad marina con metamorfismo regional y/o dinámico de bajo grado (Hincapié y Camargo, 2005), que se encuentran limitadas al oriente por la falla San Jerónimo, que la separa del Complejo Cajamarca y al occidente por la falla Silvia Pijao que lo separa del Complejo Arquía (Restrepo y Toussaint, 1976). La edad de la unidad, con base en fósiles, se determinó como cretácico inferior, Aptiano – Albiano por González (1980). Restrepo et al. (1981) determinó edades desde Cretácico temprano hasta el Cretácico tardío mediante estudios radiométricos.

### **4.1.3 Cenozoico**

#### **4.1.3.1 El Stock de Manizales (KPgcdm):**

Es un cuerpo de roca que tiene composiciones Tonalítica a Granodiorítica (López y Aguirre, 2005) que afloran al Norte del VNR con un área aproximada de 65 km<sup>2</sup>. Su morfología es ovalada con una curvatura en la zona sureste del cuerpo, el eje mayor se encuentra orientado en dirección N-NE (Aguirre y López, 2003). Se propone un cambio en el nombre de la unidad por Tonalita-Granodiorita de Manizales por López y Aguirre (2005) y la subdivide en tres facies ígneas: Tonalita biotítica con hornblenda, Tonalita biotítica y Granodiorita. Posteriormente, Plazas (2010) propone renombrarlo como Stock Tonalítico-Granodiorítico de Manizales. La edad de la unidad fue determinada por McCourt et al. (1984) mediante K/Ar en biotita, con edades de 62.4 Ma. y 3.6 Ma indicando el rango de edad de enfriamiento de este cuerpo.

#### **4.1.3.2 El Batolito del Bosque (Pgdb):**

Es un cuerpo intrusivo de textura porfirítica hipoabisal que aflora al oriente del VNR definido por Barrero y Vesga (1976). Su composición es granodiorítica biotítica e intruye a rocas metamórficas del Complejo Cajamarca.

#### **4.1.3.3 La Formación Casabianca (NgQcb):**

Es una unidad conformada por rocas volcano sedimentarias derivadas de la actividad del Volcán Cerro Bravo y Volcán Nevado del Ruiz, que se depositaron a ambos de la Cordillera Central de Colombia (Borrero y Naranjo, 1990).

#### **4.1.3.4 Grupos de Lavas:**

Thouret et al. (1990) propuso grupos de lavas para los periodos del Ruiz Ancestral y Ruiz Viejo. Estas son producto de las erupciones de los volcanes Nevado de Ruiz, Cerro Bravo, Nevado de Santa Isabel, Paramillo del Cisne y Paramillo de Santa Rosa. Estas lavas poseen

composiciones intermedias a ácidas y corresponden principalmente a andesitas, traquiandesitas y dacitas (Mejía, 2012).

#### **4.1.3.5 Depósitos de Flujos Piroclásticos (Qfl):**

Material arrastrado, retrabajado y re-depositado resultado de las erupciones recientes de los volcanes Nevado del Ruiz, Cerro Bravo, El Cisne, Nevado de Santa Isabel, Paramillo de Santa Rosa, Nevado del Quindío y Nevado del Tolima. Estos flujos de lodo volcánico dejan geoformas características y se pueden observar principalmente en los cauces de los drenajes dentro de la zona. Composicionalmente, la matriz la constituye en su mayoría cenizas, arenas, lapilli pumítico, fragmentos de rocas volcánicas con 40-60% de cantos de rocas volcánicas con ocasionales bloques de rocas metamórficas y granodioritas. El tamaño y la cantidad de bloques decrecen a medida que se aleja de las fuentes volcánicas (González, 2001).

#### **4.1.3.6 Depósitos de Caída Piroclástica (Qto):**

Extenso grupo de depósitos entre los que se encuentran paleosuelos intercalados con unidades de tefras producto de las erupciones del Volcán Nevado Ruiz y los demás volcanes del Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín (Méndez y Patiño, 2003). Se componen por fragmentos rotos de pómez y escorias de composición dacítica, fragmentos de rocas, como dacitas y andesitas porfíricas de tamaño variable que se depositan gravitacionalmente en niveles de ceniza interestratificados con depósitos coluviales o lacustres (Naranjo y Ríos, 1989).

#### **4.1.3.7 Depósitos Glaciares (Qto):**

Se agrupan los depósitos generados por los procesos de formación y migración de los glaciares presentes en la zona desde el Pleistoceno. En estos depósitos se encuentran bloques de lavas andesíticas y andesitas basálticas en una matriz areno-arcillosa de color amarillo a blanco amarillento. Se estableció para el Volcán Nevado del Ruiz y el Nevado del Santa Isabel dos mínimos climáticos; el primero, a mediados de 1600 donde se formaron varias series de morrenas laterales y frontales; y durante el segundo mínimo climático mucho más

reciente, se presentaron depósitos similares a los del primer mínimo, pero con pequeñas oscilaciones en la generación de morrenas (Muñoz, 1998).

#### **4.1.3.8 Depósitos Aluviales:**

Se encuentran en las riveras o en los cauces de los ríos Azufrado, Molinos, Gualí y Lagunilla. Son matriz soportados con clastos redondeados a sub-redondeados, bien a moderadamente seleccionados y generalmente no consolidados (Mejía, 2012).

## 5. Marco Estructural

La configuración tectónica y el vulcanismo de Colombia es el resultado de la interacción de las placas Nazca, Cocos, Suramericana y las microplacas Coiba y Panamá (Bohórquez et al., 2005).

La zona de estudio hace parte del SVNC localizado a 200 km al Norte del Volcán Nevado del Huila (Monsalve, 2020) y corresponde al Volcán Nevado del Ruiz que hace parte del CVNR (Ceballos et al., 2020).

El área de estudio está dominada por un sistema de fallas transcurrentes que favorece el fracturamiento de roca, la circulación de fluidos y la aparición de fuentes termales (Toro y Osorio, 2005) y que de forma general tienen orientaciones N-S y NE-SW. Las fallas más cercanas al edificio volcánico son las fallas Palestina, San Jerónimo, Santa Rosa, y Villamaría-Termal.

La zona de estudio se encuentra en el vulcanismo del SVNC, emplazado en el microbloque limitado al N por la Falla Río Arma, al S por la Falla Ibagué, al W por la Falla San Jerónimo y al E por la Falla Mulatos (Bohórquez et al., 2005).

Según López (2013), los rasgos estructurales en la zona de estudio están estrechamente relacionados con los principales rasgos del sistema tectónico andino con dirección NE y con un sistema transversal con dirección NW-SE y EW. Los rasgos en dirección NE están relacionados con las fallas Palestina y San Jerónimo. Los rasgos en dirección NW-SE y EW están relacionados con las fallas Villamaría Termal, Campoalegrito, San Ramón, San Eugenio y Santa Rosa. En la Tabla 1 se muestra una recopilación de las principales fallas de la zona de estudio, con base en el trabajo de Bohórquez et al. (2005).

La región es sometida estructuralmente a esfuerzos compresivos como resultado de la convergencia oblicua entre las placas Nazca y Suramericana. El vector de convergencia de la placa Nazca se puede descomponer en dos vectores: uno ortogonal a la margen estructural que favorece el acortamiento e inversión de las estructuras NE-SW y corresponde al vector de deformación; y otro vector de desplazamiento que es paralelo a la margen estructural y facilita la reactivación de fallas en dirección NW-SE (López, 2013).

GRUPO DE ESTRUCTURAS	FALLAS Y LINEAMIENTOS	TIPO DE FALLA	RUMBO Y BUZAMIENTO
N-S	Palestina	Dextral Normal	NNE/W
NE-SW	Santa Rosa	Sinestral Normal	N70E/75SE
NW-SE	Villamaría-Termale	Normal	NW/SE
	Nereidas	Normal	NW/SE
	Río Claro	Normal	NW/SE

**Tabla 1.** Principales grupos de estructuras del área de estudio. Modificado de Bohórquez et al. (2005).

En el área proximal-media del CVNR se destacan cuatro sistemas de estructuras. Dos de tendencia NW-S, de tipo transcurrente dextro lateral, asociadas al Sistema de Fallas Palestina y la Falla Santa Rosa. Estas estructuras son desplazadas por estructuras transversales como el Sistema de Fallas Villamaría-Termale con tendencia N40-50W y comportamiento normal sinextrolateral. La Falla Nereidas con tendencia E-W y la Falla Río Claro con tendencia NW-SE que marcan un carácter distensivo en la zona (Martínez et al., 2014).

También Martínez et al. (2014), indica que hacía el W se observan estructuras geológicas regionales con tendencias N-S y NNE-SSW correspondientes a los sistemas de fallas Samaná Sur, San Jerónimo, Manizales Aránzazu y Silvia Pijao, entre otras. Entre el eje de la Codillera Central y la Falla San Jerónimo se encuentran las fallas Olleta-Nereidas y Pico Terrible, y algunos segmentos de la Falla Samaná Sur.

El Sistema de Fallas Palestina posee en la parte N un sentido NNE y en el tramo entre Manzanares y Villa Hermosa se intercepta con fallas que tienen sentido NE-SW, lo que ha llevado a plantear la hipótesis que la Falla Palestina cambia de rumbo hacia el VNR. Se reconocen en la Falla Palestina hacia el sur, trazos subparalelos y una estructura en cola de caballo, típica al final de fallas de rumbo (Bohórquez et al., 2005). El comportamiento predominante del Sistema de Fallas Palestina es en dirección N20-30E de tipo rumbo lateral-derecho (Mejía et al., 2012). En el CVNR, esta falla ejerce un fuerte control estructural en el flanco NE, sobre el nacimiento del río Azufrado con presencia de fuerte alteración hidrotermal y una cicatriz de anfiteatro asociado al colapso del flanco del edificio reciente, probablemente debido a la actividad de esta falla (Martínez et al., 2014). Este sistema coincide con la alineación de los focos volcánicos del CVNR, el Paramillo del Cisne y el Complejo Volcánico Santa Isabel y constituye una zona de alimentación de la actividad volcánica que se desarrolla desde el Terciario (CHEC, 1983; González y Jaramillo, 2001; Cárdenas, 2004; Cárdenas et al., 2004; Acosta et al., 2007).

El Sistema de Fallas Villamaría-Termal fue definido por Thouret (1988) como una falla de rumbo sinextrolateral. Estudios posteriores determinaron un régimen normal con dirección WNW-ESE paralela a la Falla Arma (González y Jaramillo, 2002). Este sistema de fallas en el sector NE del CVNR afecta las rocas del Stock de Manizales, los flujos de lava del CVNR y los depósitos volcánicos holocénicos. Hacia el N, se asocia la presencia de estructuras como la lava fisural La Esperanza, el domo colada La Laguna, el domo Santa Ana y el domo El Plato (Martínez et al., 2014). En el sector El Arbolito en el flanco N del CVNR, el Sistema de Fallas Villamaría-Termal se cruza con las fallas Santa Rosa y Olleta-Nereidas,

generando fracturas, diaclasas y sismos en el sector como los ocurridos en el 2012 y 2013 (Martínez et al., 2014). Típicamente, la Falla Villamaría-Termaleles se considera normal con componente sinistral, con dirección general N75W (González y Jaramillo, 2001), asociada con el emplazamiento de domos como Sancancio, Gallinazo y Tesorito a lo largo del rumbo de esta estructura (González y Jaramillo, 2001). Esta falla está asociada a lo que llama Botero-Gómez et al. (2018) como Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termaleles y según Borrero et al. (2009), estos se encuentran emparentados espacial, estratigráfica y geoquímicamente con los productos volcánicos del VNR.

Guzmán et al. (1998) definió la Falla Santa Rosa como una falla de tipo inversa dextral paralela a la Falla Ibagué. Su rumbo es N60-70E y a nivel regional se extiende a través de la Cordillera Central con un marcado control estructural sobre el río Gualí con un rumbo aproximado de N60/70E y hacia el NW controla algunos segmentos de los ríos Azufrado y Molinos. En el último sector, la falla es desplazada por sistemas N-S, SSW-NNE y sistemas transversales NW-SE (Martínez et al., 2014). La Falla Santa Rosa se ha reportado con diferente comportamiento cinemático por diferentes autores: desplazamiento lateral derecho por Guzmán et al. (1998) y lateral izquierdo con componente normal en Bohórquez et al. (2005).

La Falla Nereidas se asocia con las fallas Campoalegrito, San Ramón, San Eugenio y Río Claro y presenta un comportamiento normal con componente lateral izquierdo (CHEC, 1983). Al Oeste del CVNR la Falla Nereidas controla los cauces de la Quebrada Nereidas y del Río Claro donde se observan escarpes de falla y basculamiento de bloques con tendencia al Sur, indicando un comportamiento de tipo normal (Martínez et al., 2014).

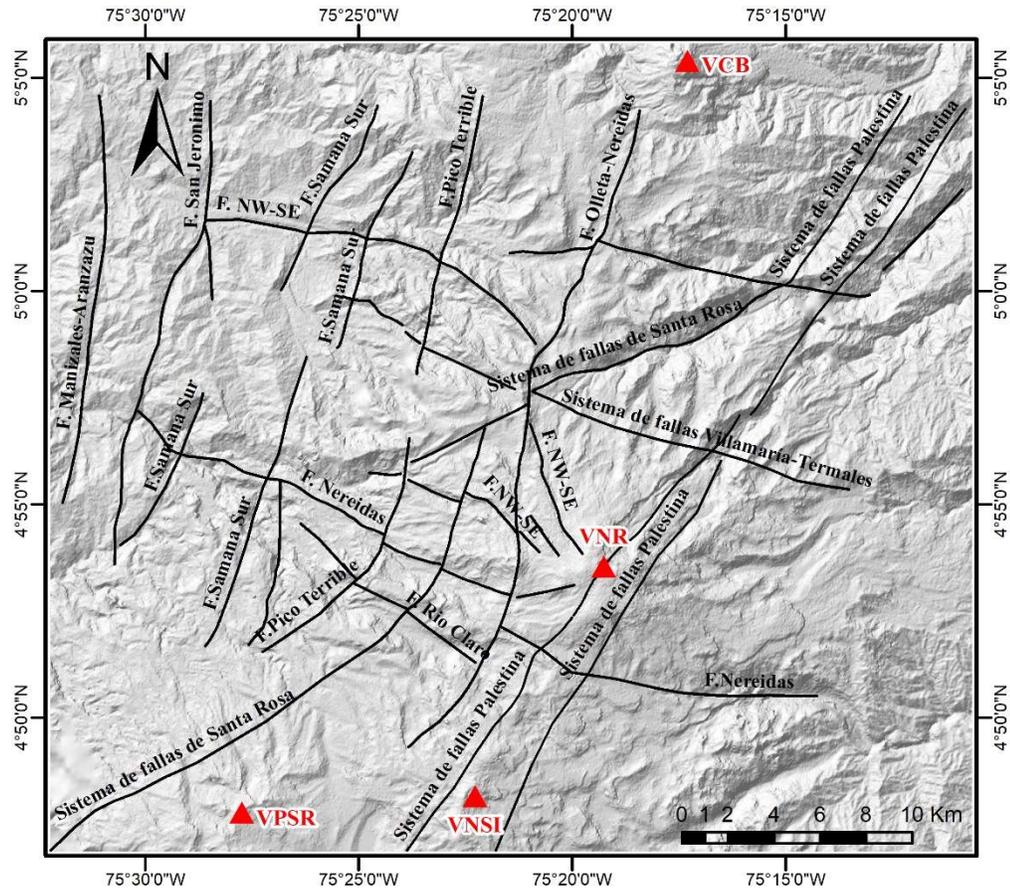
La Falla Olleta-Nereidas es propuesta por Martínez et al. (2014) como una falla de tendencia N-S a SSW-NNE. Está localizada entre el edificio La Olleta y el VNR. Los autores encontraron que esta falla afecta el cauce de las Quebradas Nereidas y Alfombrales en sentido lateral izquierdo y relacionado a esta falla se presentan cicatrices de colapso de dos depósitos

de avalancha de escombros: Playa Larga y Santa Inés. Respecto a su dinámica, en la parte N presenta tendencia  $N40^{\circ}-50^{\circ}E$  asociada al emplazamiento del domo colada La Laguna y el domo colada Santana. Los estudios de mecanismos focales en una fuente sismogénica cercana encontraron un régimen strike-slip con variaciones significativas a un régimen compresional (Martínez et al., 2014).

La Falla Pico Terrible fue propuesta por Martínez et al. (2014) como una falla con tendencia  $N20^{\circ}-30^{\circ}E$ . Su identificación se hizo por rasgos morfotectónicos como deflexiones de cause en sentido lateral derecho, cuchillas alineadas, escarpes de falla, cauces rectilíneos y hombreras alineadas. El comportamiento de esta falla podría ser de tipo extensional o normal con tendencias entre N-S y  $N40^{\circ}-85^{\circ}E$  y buzamientos entre  $40^{\circ}-85^{\circ} SE$ .

La Falla Samaná Sur hace parte de un sistema de fallas localizado al Este de la Falla San Jerónimo (Martínez et al., 2014). El comportamiento de esta falla es de movimiento lateral derecho, inverso y con rumbo  $N30^{\circ}E$  (Gonzáles, 1980).

La Falla San Jerónimo comúnmente se relaciona como un trazo del “Sistema de Fallas de Romeral” compuesta por numerosas fallas paralelas a sub-paralelas en dirección N-S. Localmente, la Falla San Jerónimo es inversa con desplazamiento lateral izquierdo; pone en contacto las rocas metamórficas continentales paleozoicas del Complejo Cajamarca al Este, con rocas de afinidad oceánica y edad Cretácica del Complejo Quebradagrande al occidente (Maya y González, 1995). Cuéllar et al. (2003) establecieron en cercanías de Manizales dos estadios generales de deformación para esta falla; el primero caracterizado por movimientos subhorizontales dextrales y el segundo por movimientos subverticales inversos, compatibles con un modelo tectónico de transpresión dextral.



**Figura 4.** Mapa de fallas activas del VNR (modificado de Ceballos et al., 2020) montado sobre DEM de 90 m de la NASA (Jarvis, et al., 2008; <https://cgiarcsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>).

## 6. Antecedentes

Adamo (2017) en su tesis “2010-2017 Geodetic Monitoring of Nevado del Ruiz, Colombia” obtuvo series temporales y velocidades de deformación de las estaciones GNSS que fueron confirmadas con datos InSAR propuestos por otros autores. Los datos fueron obtenidos de 8 estaciones GNSS de la red de monitoreo del VNR establecida y operada por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (OVSM) del Servicio Geológico Colombiano (SGC), desde el 2010 hasta el 2017

Alpala et al. (2017) en el artículo titulado “Monitoring remote volcanoes: The 2010–2012 unrest at Sotará volcano (Colombia)” identificó una intrusión magmática emplazada a 1 km de profundidad de la superficie del volcán, la cual originó una deformación desde mediados de 2010 hasta finales de 2012. Alpala determinó esto usando la información que obtuvo de tres inclinómetros electrónicos biaxiales y una estación GNSS permanente de la red de monitoreo del Volcán Sotará que es operada y monitoriada por el SGC a través del Observatorio Volcanológico y Sismológico de Popayán.

Medina et al. (2017) en el artículo “Twenty years (1990–2010) of geodetic monitoring of Galeras volcano (Colombia) from continuous tilt measurements” expone el resultado de los datos adquiridos durante 20 años por una red conformada por ocho inclinómetros electrónicos, seis estaciones GNSS permanentes y 11 estaciones EDM, pertenecientes al SGC - Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto. Medina logró identificar dos fuentes de deformación asociadas a intrusiones de magma poco profundas; una de algunos pocos cientos de metros en el 2006, y otra a dos kilómetros de profundidad en 2009.

Barbero et al. (2018) en el artículo “Assessment of ground deformation following Tenerife’s 2004 volcanic unrest (Canary Islands)” encontró en la caldera central de Las Cañadas (Tenerife, Islas Canarias) deformaciones que muestran evidencias de esfuerzos compresionales causados por la subsidencia gravitacional del cono volcánico central. También determinó una fuente de deformación relacionada con la migración de fluidos o el emplazamiento de un cuerpo relacionado con el periodo de actividad que inicio en el 2004. Barbero recopiló datos de la red GNSS TEGETEIDE desde 2005 hasta el 2015.

Ji et al. (2017) en el artículo “Deep magma accumulation at Nyamulagira volcano in 2011 detected by GNSS observations” recopiló y analizó información GNSS del volcán Nyamulagira en las Montañas Virunga, República Democrática del Congo. Ji utilizó datos de la red GNSS KivuGNet (Kivu Geodetic Network) que permitieron determinar un evento inflacionario desde octubre de 2010 y que duró aproximadamente seis meses, antes de la erupción de 2011-2012. Se encontró que la señal inflacionario pre eruptiva fue mucho más débil que la observada durante la erupción y se logró modelar una fuente de deformación a más de 10 km de profundidad que explicaba la deformación sugiriendo una fuente profunda para el magma que posiblemente alimente una cámara magmática más superficial responsable de la erupción de 2011 y 2012.

Ávila-Barrientos et al. (2021), en la publicación “Surface deformation of Ceboruco volcano, Nayarit, Mexico” utilizó dos estaciones GNSS e identificó mediante la elaboración de series de tiempo, periodos inflacionarios y deflacionarios en el edificio volcánico del volcán Ceboruco que se relacionaron con cambios en el sistema magmático del volcán.

Doke et al. (2018), en el artículo “GNSS Observation and Monitoring of the Hakone Volcano and the 2015 Unrest” utilizó una red de 16 estaciones GNSS para identificar eventos inflacionarios asociados a enjambres sísmicos en el volcán Hakone, Japón. Doke utilizó

series de tiempo, vectores de desplazamiento y mapas de esfuerzos. El evento inflacionario general se explicó por un cambio de volumen en un cuerpo localizado aproximadamente a 6,5 km por debajo del nivel del mar.

Peci et al. (2012), en el artículo “IESID: Automatic system for monitoring ground deformation on the Deception Island volcano (Antarctica)” describe el desarrollo de un sistema integrado automático para el monitoreo de la deformación volcánica en casi tiempo real del volcán Deception, Antártida. Peci utilizó tres estaciones GNSS permanentes ocupadas en 3 campañas diferentes: 2008, 2009 y 2010. Entre las campañas de 2008 y 2009 se evidenció un proceso deflacionario que se revirtió entre las campañas de 2009 y 2010.

Cordova et al. (2015), en el artículo “Monitoreo de la deformación en volcanes chilenos mediante técnica GPS, resultados asociados a la actividad de los volcanes Laguna del Maule, Copahue y Villarrica” muestra la información obtenida por la red de monitoreo GNSS del Observatorio volcanológico de los Andes del Sur desde finales del 2011 para los sistemas volcánicos Laguna del Maule, Copahue y Villarrica. Cordova utilizó modelos que se ajustaban a los procesos deformativos observados en los volcanes, estimando profundidades y cambios de volumen en las fuentes de deformación.

Boixart et al. (2020), en el artículo “Source Model for Sabancaya Volcano Constrained by DInSAR and GNSS Surface Deformation Observation” muestra el análisis de los datos DInSAR y de cinco estaciones GNSS desde el 2014 hasta el 2019 del volcán Sabancaya, Perú, el cual está en erupción desde el 2016 hasta el presente. Boixart logró identificar un área inflacionaria a 5 km al Norte del volcán y a una profundidad de 12 a 15 km. Esta información se contrasta con datos regionales y sismológicos que infieren que la erupción del volcán esta alimentada por un reservorio magmático regional profundo.

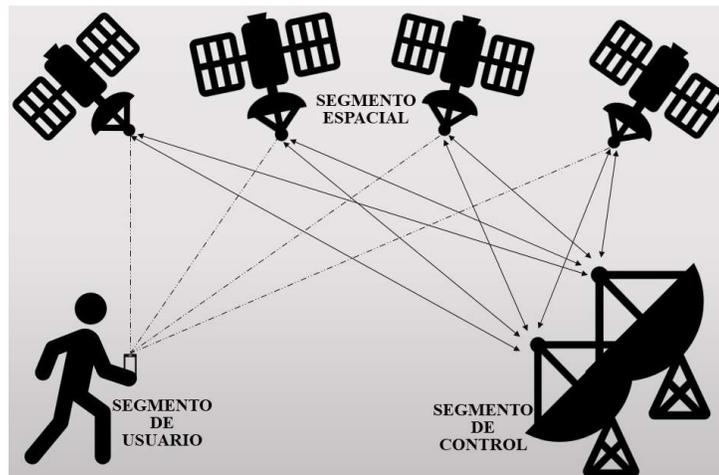
De Guidi et al. (2018), en el artículo “The unstable eastern flank of Mt. Etna volcano (Italy): First results of a GNSS-based network at its southeastern edge” muestra el resultado de las observaciones obtenidas por dos subredes GNSS instaladas en 2010 y 2014 en el flanco E del volcán Mt. Etna debido a la inestabilidad observada y al riesgo de subsidencia y deslizamiento de una gran parte del edificio volcánico. El monitoreo geodésico fue realizado desde finales del 2014 y mostró un desplazamiento del área estudiada hacia el SE causado por la presencia de algunas fallas locales.

## 7. Marco Teórico

### 7.1 GNSS

El Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS) agrupa a todos los sistemas satelitales de navegación existentes en la Tierra, incluye el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) que fue diseñado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos con fines militares bajo el nombre de NAVSTAR-GPS1 y a finales de los 80's se empezó a utilizar en aplicaciones civiles. Este sistema posee una organización definida por un conjunto de sistemas tecnológicos de navegación mediante una serie de satélites que suministran el posicionamiento geoespacial de una manera autónoma. Este sistema es capaz de establecer su posición en cuatro dimensiones que son longitud, latitud, altitud y tiempo (Pozo-Ruz et al., 2000).

El sistema GNSS posee tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario. El segmento espacial está conformado por varios satélites que constituyen el sistema de navegación y de comunicación que orbitan alrededor de la Tierra, repartiéndose en los diferentes planos orbitales, donde, los de navegación tienen la función de corregir los errores de posicionamiento mejorando la precisión del sistema. El segmento de control está conformado por estaciones en tierra que recogen los datos de los satélites con el fin de garantizar asistencia al sistema, como también aplicar correcciones a la posición orbital y temporal de los satélites. El sistema de usuario está conformado por los equipos GNSS empleados en la Tierra, que reciben las diferentes señales del segmento espacial. El segmento del usuario está conformado por una antena receptora con una frecuencia variable según la cobertura de la que se disponga y un receptor que realiza el proceso de conversión de la frecuencia para almacenar la información. Además, el receptor guarda información sobre los errores producidos por la distancia de transmisión de la señal y efectos atmosféricos (Peñañiel y Zayas, 2001). En la Figura 5 se muestra la configuración del segmento espacial, segmento de control y segmento de usuario.



**Figura 5.** Segmentos del sistema de satélites.

El funcionamiento del sistema GNSS se basa en la recepción, envío y aprovechamiento de la información para el cálculo de la posición, basada en la posición del satélite y su reloj. Estos datos son transmitidos por la señal enviada hasta el receptor por un satélite y para esto se llevan a cabo los siguientes pasos: primero el usuario conoce los parámetros transmitidos por los satélites, luego el receptor GNSS establece su distancia a los satélites para calcular su posición midiendo el tiempo que tarda en llegar la señal a él, después cada satélite indica al receptor que se encuentra en un punto específico en la esfera, siendo el centro la ubicación en dos dimensiones y el radio la distancia al receptor. Finalmente, para conseguir la posición se necesitan al menos cuatro satélites, siendo el último de estos el que elimina los errores de sincronismo y permite calcular la Altura (Álvarez, 2008).

Conociendo la distancia entre el usuario y los satélites se tiene una esfera de posibles localizaciones (Figura 6), las cuales pueden reducir en gran proporción la incertidumbre, esta medición se hace multiplicando el tiempo de transmisión de la señal emitida desde el satélite por su velocidad de propagación (Pozo-Ruz et al., 2000).



**Figura 6.** Representación de la triangulación para establecer la posición de un receptor.

El posicionamiento se calcula utilizando el método matemático de trilateración algebraica de geometría de triángulos, planteando un modelo de  $n$  ecuaciones en función de los satélites utilizados, siendo  $r_i$  la distancia al satélite,  $(X_{si}, Y_{si}, Z_{si})$  las coordenadas de cada satélite y  $(X_u, Y_u, Z_u)$  las coordenadas del punto (Vílchez, 2019):

$$r_1^2 = (x_u - x_{s1})^2 + (y_u - x_{s1})^2 + (z_u - z_{s1})^2$$

$$r_2^2 = (x_u - x_{s2})^2 + (y_u - x_{s2})^2 + (z_u - z_{s2})^2$$

$$r_3^2 = (x_u - x_{s3})^2 + (y_u - x_{s3})^2 + (z_u - z_{s3})^2$$

...

$$r_n^2 = (x_u - x_{sn})^2 + (y_u - x_{sn})^2 + (z_u - z_{sn})^2$$

Este principio se basa en la sincronización entre la referencia temporal usada por el satélite y el receptor. El sistema de satélites utiliza códigos pseudo-aleatorios que permiten el control y el acceso a los receptores, por lo tanto, para evitar situaciones conflictivas se cambian dichos códigos de forma que todos los satélites utilizan una banda de frecuencia única sin interferencia por lo que poseen un código GNSS propio (Pozo-Ruz et al., 2000).

Los sistemas GNSS usan como unidad de tiempo el tiempo universal coordinado (UTC) que es equivalente al Greenwich Mean Time (GTM). El US Naval Observatory establece el GPS Time, que es la escala de tiempo atómico o GPS Time y cuya unidad es el segundo atómico internacional. El origen de la escala GPS se fijó de forma coincidente con el UTC, a las 0 horas del 6 de enero de 1980 (Peñañiel y Zayas, 2001).

La creciente evolución tecnológica llevo a la aparición de nuevas herramientas, aplicaciones y funcionalidades que constantemente se actualizan en los sistemas GNSS para mejorar los servicios y añadir nuevos. Los sistemas GNSS que existen en la actualidad son: GPS (Estados Unidos), GLONASS (Rusia), Galileo (Unión Europea), COMPASS/BeiDou (China), IRNSS (India), QZSS (Japón), entre otros.

El sistema GNSS tiene muchas aplicaciones y un impacto positivo en todos los sectores, ya que es una herramienta poderosa para el posicionamiento de puntos sobre la superficie terrestre, así como la navegación, orientación, localización de objetivos y cálculo de rutas para dispositivos integrados de automóviles, aviones, camiones, barcos. El sistema GNSS es utilizado para la localización en estudios geológicos, geofísicos, ingenieriles, manejo de emergencias, agricultura, trazado de linderos, optimización de recursos, inspección y mapeo de territorios, Sistemas de Información Geográfica (SIG), telefonía móvil y un sin número de aplicaciones civiles (Álvarez, 2008).

## **7.2 Estaciones GNSS**

Una estación GNSS está constituida por un receptor GNSS y una antena GNSS.

### 7.2.1 Receptor GNSS

Un receptor GNSS (Figura 7) se constituye como una estación GNSS de alta precisión muy versátil y robusta, de muy bajo peso que puede ser operada en ambientes muy agrestes y bajo condiciones meteorológicas extremas. Un receptor GNSS puede operarse como una estación de referencia de operación continua (CORS) para realizar mediciones absolutas, como estación portátil para realizar mediciones GNSS cinemáticas en tiempo real (RTK), como estación de referencia o base para realizar mediciones GNSS diferenciales (DGPS), o como estación móvil (Rover) para realizar mediciones GNSS tipo campaña.

Un receptor GNSS tiene la capacidad de recibir señales satelitales de los sistemas GPS (L1, L2, L2C y L5) y GLONAS (L1/L2). Adicionalmente puede recibir señales basadas en la tecnología SBAS (Space Based Augmentation System) y QZSS (Quasi-Zenith Satelital System) tanto de las señales americanas WAAS, así como EGNOS de Europa y MSAS de Japón. También puede recibir señales del sistema chino BDS o BeiDou.

Una estación GNSS puede operar a alta velocidad con registro de datos de hasta 50 muestras por segundo (50 Hz) los cuales son protegidos para evitar pérdidas. Es posible programar varias sesiones simultáneas e independientes en las cuales se puede variar la tasa de muestreo y la duración de la medición de manera particular para cada una.

Un receptor GNSS posee muchísimos canales disponibles para recibir las señales satelitales, de los cuales cuatro son dedicados exclusivamente al sistema SBAS, una memoria integrada al circuito interno lo que permite un gran almacenamiento y protección a los datos. La transferencia de datos puede realizarse a través de múltiples puertos integrados y por

comunicación tipo Bluetooth. El receptor GNSS puede ser operado remotamente por medio de una conexión de radio-modem o a través de Ethernet.

Un receptor GNSS geodésico ofrece precisiones para mediciones estáticas de  $\pm 5 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm}$  en Horizontal y  $\pm 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$  en Vertical. Para mediciones absolutas se pueden obtener precisiones de  $\pm 5 \text{ mm}$  en Horizontal y  $\pm 7 \text{ mm}$  en Vertical.



**Figura 7.** Receptor GNSS, marca Trimble, modelo NetR9.

### 7.2.2 Antena GNSS

Una antena GNSS (Figura 8) puede ser de tipo “Ground Plane” o Chocke Rin, la cual está diseñada para reducir el efecto de Multipath y ofrece una precisión sub-milimétrica en la fase de centrado. Una antena GNSS está diseñada para operar en ambientes muy agrestes y bajo

condiciones meteorológicas extremas, es muy liviana ideal para ser fácilmente transportada en los volcanes.



**Figura 8.** Antenas GNSS marca Trimble, modelos Choke Ring y Zephyr Geodetic 2.

### 7.3 Bases de Datos

Una base de datos es una colección organizada de datos o información estructurada, generalmente almacenados electrónicamente en una computadora o servidor, controlada por un sistema de gestión de base de datos (Data Base Management System o DBMS). En conjunto, los datos, el DBMS junto con las aplicaciones que están asociados con ellos, se conocen como un sistema de base de datos, que a menudo se reducen a solo base de datos (ORACLE, 2021). Las bases de datos están diseñadas para manejar un volumen mayor de información, además de permitir el acceso a múltiples usuarios.

Existen servidores basados en hardware y software. Un servidor basado en hardware o “anfitrión” es una máquina física, conectada a una red de equipos, en el que pueden funcionar uno o varios servidores basados en software. Así, un servidor basado en software se define como un programa que ofrece un servicio específico para otros programas llamados

“clientes” que funcionan en el mismo equipo o se conectan a él por medio de una red. Este modelo de comunicación se denomina cliente-servidor (IONOS, 2020).

#### 7.4 Red Geodésica del VNR

La red geodésica del VNR es implementada y operada por el SGC - OVSM con el objetivo de monitorear la actividad volcánica. La red geodésica está compuesta por diez estaciones GNSS (BIS, BLLR, GUAL, INDE, NERE, OLLE, PIRA, RECM, RUBI, SINN) y diez inclinómetros electrónicos (AZU2, AZUF, BIS, BIS2, GUAL, LIS2, LISA, NER2, NERE, RECI, REFU). La red es operada en el marco del proyecto “Operación y mantenimiento de las redes de monitoreo de volcánico”. Las estaciones GNSS están ubicadas en el área de influencia del VNR, cubren todos los flancos del volcán y transmiten los datos en tiempo real hacia el observatorio ubicado en la ciudad de Manizales. En la Tabla 2 se describe la red de deformación del VNR y en la Figura 9 se muestra un mapa con su ubicación.

Estación	Distancia al cráter (km)	Flanco	Fecha de instalación
BLLR	10,46	SE	Junio de 2013
BIS0	1,9	W	Mayo de 2017
GUAL	1,9	NW	Julio de 2011
INDE	5,3	NW	Noviembre de 2017
NERE	3,98	SW	Agosto de 2011
OLLE	4,1	W	Diciembre de 2011
PIRA	4,15	NE	Marzo de 2013
RECM	3,83	SW	Abril de 2018
RUBI	4	NE	Diciembre de 2012
SINN	3,83	SW	Diciembre de 2012

**Tabla 2.** Estaciones GNSS de la red geodésica del VNR. Se indica la distancia al cráter, el flanco donde se ubican las estaciones y la fecha de instalación.

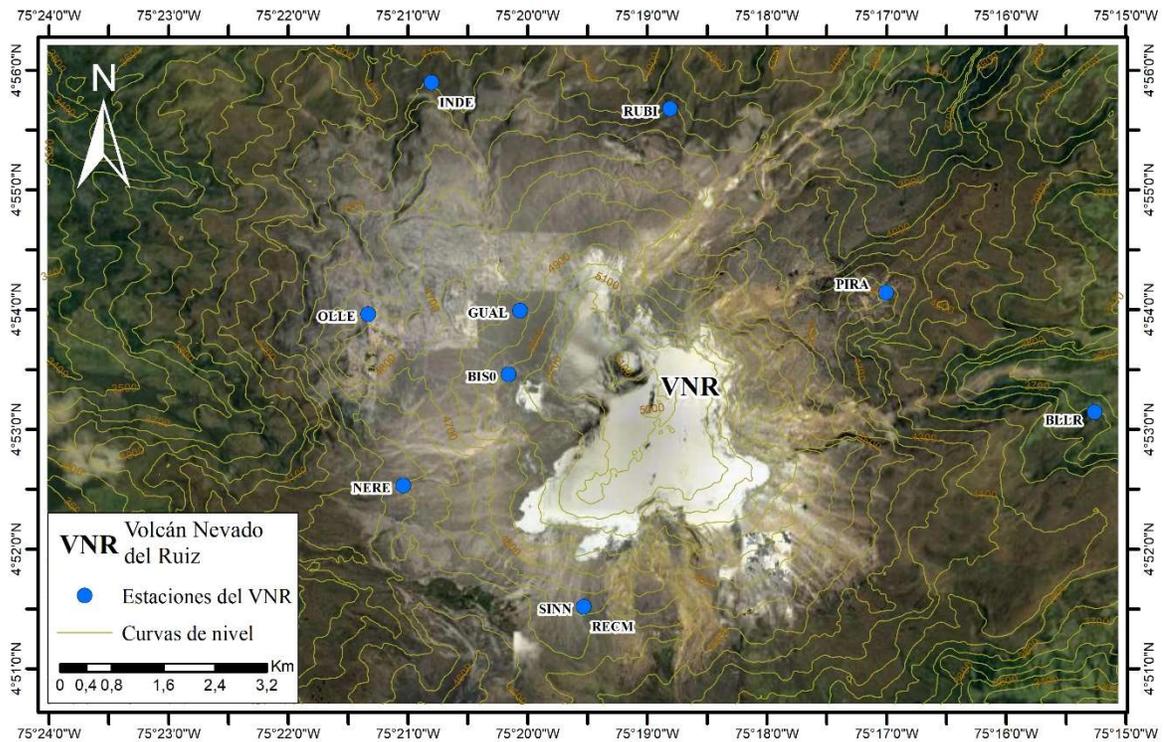


Figura 9. Mapa con la localización de las estaciones GNSS de la red geodésica del VNR.

## 7.5 Construcción de Estaciones GNSS

La construcción en la estación GNSS se realiza con un monumento donde se instala la antena GNSS y en un costado se materializa un mástil para soportar el gabinete y dentro de él: el receptor GNSS, los equipos de comunicación y la red eléctrica de alimentación de la estación (Ordóñez, 2018).

### 7.5.1 Materialización del Monumento de la Antena GNSS

### 7.5.1.1 Perforación de la Roca

Empleando un taladro percutor de alta potencia (Pionjar) (Figura 10), el SGC – OVSM realiza cuatro perforaciones de dos pulgadas de diámetro sobre la lava o roca seleccionada, logrando un agujero principal en el centro de la roca de 70 cm de profundidad para el anclaje de una varilla de acero inoxidable de una pulgada de diámetro por 1.5 metros de longitud, sobre la cual se monta la antena GNSS, y tres perforaciones de cinco cm de profundidad ubicadas alrededor de la perforación central (Figura 11) sobre las cuales se empotra la estructura en hierro para el soporte del mojón de concreto. La estructura posee tres varillas de hierro de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro y seis flejes de hierro de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de diámetro (Ordóñez, 2018; Figura 12).



**Figura 10.** Fotografías que ilustran el proceso de perforación de la roca empleando el taladro percutor (Ordóñez, 2018).



**Figura 11.** Fotografías que ilustran las perforaciones realizadas en la roca (Ordóñez, 2018).



**Figura 12.** Fotografía que ilustra la estructura de hierro (Ordóñez, 2018).

### 7.5.1.2 Cementado de las Varillas

El acople a la roca tanto de la varilla central de acero inoxidable, como de las tres varillas de la estructura de hierro se realiza por medio de un pegante epóxico (Ordóñez, 2018; Figura 13). A la varilla central se le acopla un cable de cobre para la conexión al sistema de protección contra descargas eléctricas (Ordóñez, 2018; Figura 14). La nivelación de la varilla central se logra por medio de niveles de albañilería que permiten obtener una correcta verticalidad de la varilla (Ordóñez, 2018; Figura 15).



**Figura 13.** Fotografías que ilustran el cementado de la varilla de acero inoxidable y la estructura de hierro (Ordóñez, 2018).



**Figura 14.** Fotografías que ilustran el proceso de acople del cable de cobre para la conexión al sistema de protección contra descargas eléctricas (Ordóñez, 2018).



**Figura 15.** Fotografías que ilustran el proceso de nivelación de la varilla de acero inoxidable (Ordóñez, 2018).

### 7.5.1.3 Instalación de la Formaleta y Fundición del Monumento

Una formaleta PVC de 25 cm de diámetro por 85 cm de Altura es instalada alrededor de la estructura de hierro y debidamente centrada y nivelada sobre la roca (Ordóñez, 2018; Figura 16). Dentro de la formaleta se instala una manguera de 2.5 pulgadas de diámetro para introducir y proteger el cable de conexión entre la antena GNSS y el receptor GNSS (Ordóñez, 2018; Figura 17). La formaleta es vaciada con un concreto ciclópeo en relación 1:2:3 ( $\frac{1}{2}$  bulto de cemento, 1 bulto de arena y 1,5 bultos de grava) (Ordóñez, 2018; Figura 17). El fraguado del concreto del monumento o mojón de la estación GNSS se logra utilizando un acelerante rápido, proceso que concluye en 24 horas y permite obtener la madurez y rigidez del concreto.



**Figura 16.** Fotografías del montaje de la formaleta PVC y de la manguera para protección del cable de conexión entre la antena GNSS y el receptor GNSS (Ordóñez, 2018).



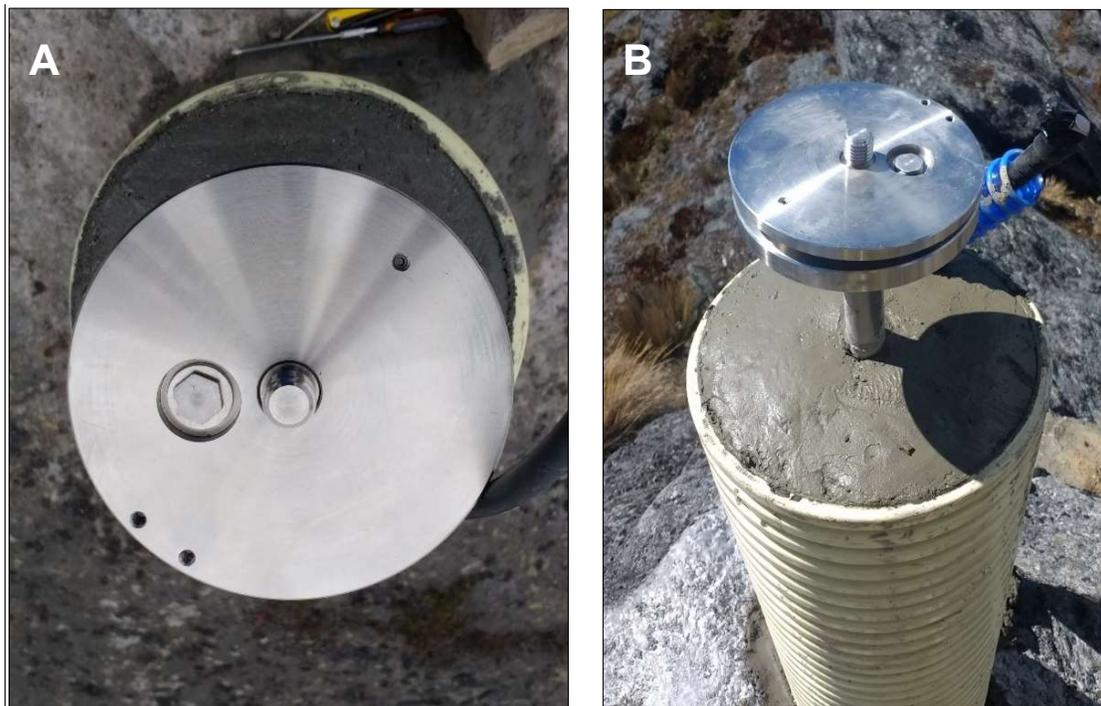
**Figura 17.** Fotografías de la fundición del mojón de concreto y la disposición final de la varilla para el acople de la antena GNSS (Ordóñez, 2018).

### 7.5.2 Montaje e Instalación de la Antena GNSS

La varilla de acero inoxidable posee un dispositivo roscado (Ordóñez, 2018; Figura 18) soldado en el extremo superior al cual se acopla una base nivelante de acero inoxidable provista de dos plataformas circulares, una para el acople con la varilla y otra para el acople de la antena GNSS y el domo protector, y para la nivelación respectiva (Ordóñez, 2018; Figura 19). La base es nivelada empleando un nivel de albañilería y los tres tornillos de nivelación de la base (uno central y dos externos) (Ordóñez, 2018; Figura 20). Sobre la base nivelante de acero inoxidable se monta la antena GNSS, orientándola hacia el norte magnético terrestre y fijando esta posición a través de un tornillo de ajuste (Ordóñez, 2018; Figura 21).



**Figura 18.** Fotografías de la varilla de acero inoxidable y el dispositivo roscado (Ordóñez, 2018).



**Figura 19.** Fotografías de la base nivelante de acero inoxidable. Vista en planta (A) y perfil (B) (Ordóñez, 2018).



**Figura 20.** Fotografías de la nivelación de la base de acero inoxidable para montaje de la antena GNSS (Ordóñez, 2018).



**Figura 21.** Fotografías del proceso de montaje y orientación de la antena GNSS (Ordóñez, 2018).

El cable de conexión al receptor se acopla, ajusta y se protege con silicona, al igual que el extremo de la manguera se protege con cinta aislante, cinta térmica y cinta multiusos para evitar humedad (Ordóñez, 2018; Figura 22). Posteriormente se pinta el mojón de concreto (Ordóñez, 2018; Figura 23).



**Figura 22.** Fotografías de la conexión del cable a la antena GNSS y la protección de la manguera (Ordóñez, 2018).



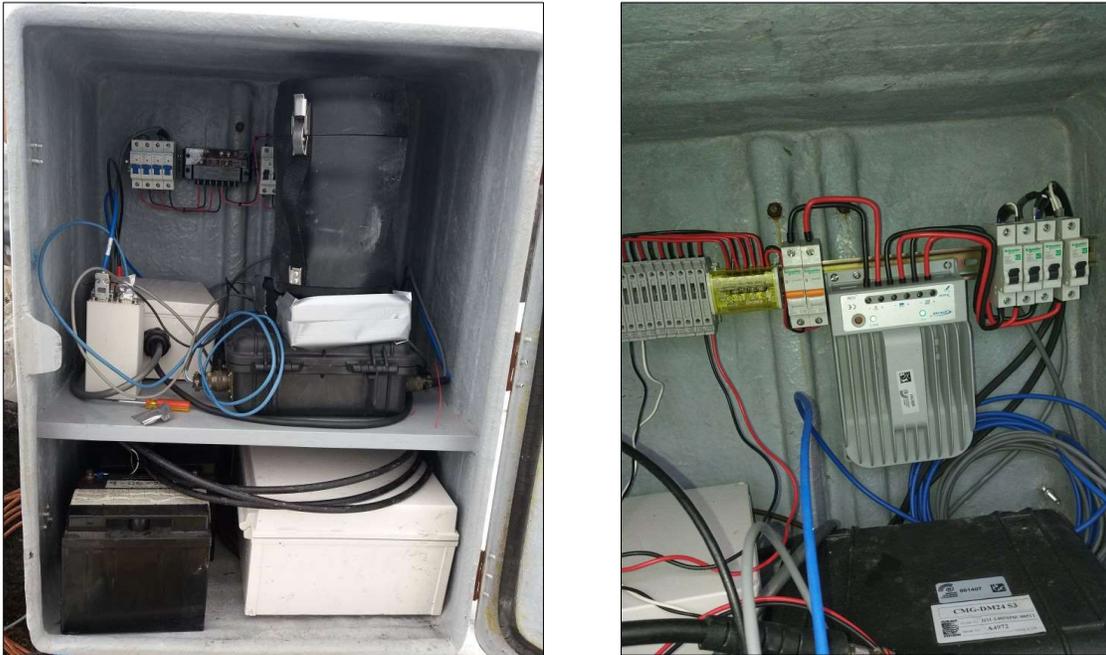
**Figura 23.** Fotografía del mojón de concreto de la estación GNSS (Ordóñez, 2018).

### 7.5.3 Gabinete para Protección de Equipos

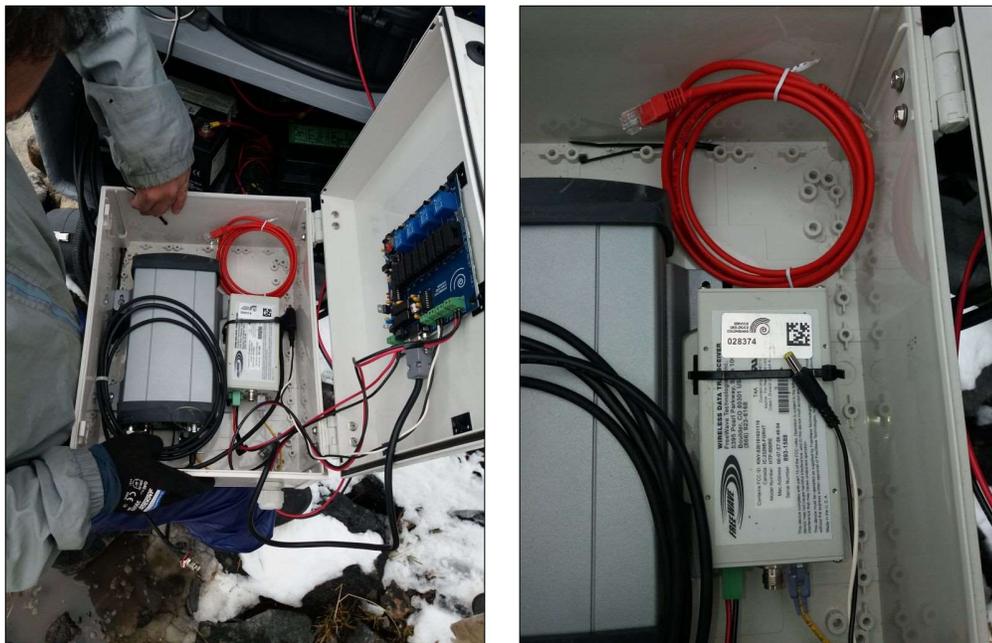
El grupo de electrónica del SGC – OVSM instala: un gabinete metálico para la protección de los equipos y los paneles solares para operar la estación GNSS (Ordóñez, 2018; Figura 24). Dentro del gabinete metálico se instala un sistema de brakers para protección y corte de energía, un polifazer, un anclaje de tierras, un regulador de voltaje, dos baterías y un radio transmisor (Ordóñez, 2018; Figura 25). El receptor GNSS (Ordóñez, 2018; Figura 26) se acopla a este sistema electrónico y de comunicación.



**Figura 24.** Fotografías del gabinete de protección de equipos y los paneles solares de la estación GNSS (Ordóñez, 2018).



**Figura 25.** Fotografías que ilustran el gabinete con dos baterías, un sistema de brakers, un polifazer, un anclaje de tierras, un regulador de voltaje, un radio transmisor y el receptor GNSS (Ordóñez, 2018).



**Figura 26.** Fotografías que ilustran la caja de protección del receptor GNSS, en la cual adicionalmente se instaló el radio de comunicaciones y una tarjeta de autoencendido (Ordóñez, 2018).

#### **7.5.4 Instalación del Sistema de Protección contra Descargas Eléctricas**

Con el objeto de evitar daños graves en el receptor GNSS y en la antena GNSS debido a posibles descargas eléctricas, se realiza una adecuación inicial colocando un cable de cobre de 25 m de longitud, que se acopla a la varilla de acero inoxidable del monumento de la antena GNSS (Ordóñez, 2018; Figura 27) y que se extiende hasta el gabinete, donde se ancla al mástil y al gabinete. Paralelo al cable se coloca la manguera para proteger el cable de conexión receptor-antena GNSS (Ordóñez, 2018; Figura 28).

Posteriormente se instala un sistema de protección tipo “Hidrosolta”, el cual consiste en instalar dos dispositivos, uno cerca a la antena GNSS y otro cerca al gabinete donde está el receptor GNSS, conectándose por medio de cables de cobre y tornillos de cobre para el acople. El dispositivo de la antena GNSS está unido directamente al cable que sale de la base del mojón de concreto por medio de un acople. El dispositivo del gabinete esta unido directamente al mástil, al gabinete y al polo negativo de las baterías por medio de un acople.



**Figura 27.** Fotografías que ilustran la conexión del cable de cobre a la varilla de acero inoxidable y la disposición del mojón de concreto (Ordóñez, 2018).



**Figura 28.** Fotografías que ilustran la conexión del cable de cobre entre la antena y el gabinete (Ordóñez, 2018).

## 7.6 Base de Datos GNSS

El SGC – OVSM almacena los datos de las estaciones GNSS en una base de datos para su preservación y disposición, empleando servidores y estaciones de trabajo. El equipo donde se almacenan la información posee un procesador Intel Xeon W – 2145 de 8 núcleos y 16 hilos, 32 Gigabytes de memoria RAM DDR4 a 2666MHz, y para el almacenamiento cuenta con 4 discos rígidos de 2 Terabytes cada uno, configurados en RAID-5, el cual está configurado de manera especial en los bloques de almacenamiento para optimizar el rendimiento de lectura y escritura de datos (352 MB/s). Teniendo en cuenta el volumen de datos recibidos actualmente por las estaciones, se prevé que haya aun capacidad para almacenar 3 años más de datos. Este equipo se identifica dentro de la red del SGC -\_OVSM como Manizales - 117. El sistema operativo que utiliza este equipo es Ubuntu 20.04 de 64 bits, el cual es un sistema operativo basado en Linux.

## 7.7 Transmisión de Datos

La comunicación entre las estaciones GNSS ubicadas en el VNR y los equipos ubicados en el SGC - OVSM se realiza mediante una red telemétrica basada en el modelo de cliente-servidor, donde el quipo en la sede se identifica como servidor y la estación en campo como cliente. El equipo servidor funciona mediante el software comercial Trimble 4D Control, el cual activa permanentemente un puerto de red para conexión de clientes. A la estación GNSS se le configura una dirección IP y un puerto que identifica al servidor, el cual recibe la solicitud para iniciar la transmisión de los datos y también la negociación de los parámetros de transmisión. Una vez se establece la comunicación, la estación envía automáticamente y en tiempo real los datos hacían el SGC - OVSM.

Los datos que llegan de las estaciones GNSS se almacenan en el equipo en el que se encuentra instalado el software Trimble 4D Control, identificado en la red local del SGC – OVSM como Manizales-49. Los archivos recibidos se encuentran en formato T02 a una tasa de muestreo de 30 segundos. Desde este equipo se transfieren los datos GNSS a otros equipos mediante unidades de red creadas en el Manizales-49. La transferencia de los datos GNSS a otros equipos que operan con sistemas operativos Windows, Linux o equipos de almacenamientos robustos se usa como fuente y destino las unidades de red con protocolo CIFS (Common Internet File System). CIFS es un protocolo para compartir archivos a través de una red local (LAN), estandarizada por Microsoft desde Windows 95, que define la forma en que se regula y se establece la comunicación entre dos o más sistemas que se transmiten información (Microsoft, 2013).

Algunos equipos no ofrecen acceso por unidades de red, por lo cual se usa transmisión de datos con conexiones SSH (Secure Shell) o SCP (Secure Copy Protocol). SSH es el nombre que se le da al protocolo que permite el acceso remoto a un servidor por un canal seguro en donde toda la información está cifrada. El protocolo SCP es un comando utilizado en los sistemas operativos basado en Linux, análogo al protocolo SSH (ORACLE, 2002). La transmisión de datos GNSS se hace mediante los protocolos SSH y SCP, porque los equipos de destino con sistema operativo Linux poseen el servicio SSH y los equipos con sistema operativo Windows, que no son equipos de destino, poseen la herramienta WinSCP que ayuda a establecer comunicación y transmisión de datos hacia los equipos con sistema operativo Linux.

El SGC - OVSM posee un almacenamiento robusto compartido de 48 TB (identificado como Manizales-ar1), de los cuales se han asignado 5 TB (que pueden ser aumentados) para complementar el almacenamiento del equipo local donde se almacenan los datos GNSS. También existe un almacenamiento robusto compartido con Bogotá de 3,3 PB (1 PB = 1000 TB), de los cuales se han asignado 12 TB (que pueden ser aumentados) para complementar

el almacenamiento de la sede. Este almacenamiento es alterno a los usados en la sede del SGC - OVSM y dentro de este también se sitúan los datos GNSS de los otros Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos (OVS) a nivel nacional.

## 7.8 Series de Tiempo

Las series de tiempo son secuencias de observaciones que se recogen secuencialmente de una variable. Estos datos se suelen recoger en una serie de tiempo uniforme, por lo que los datos son dependientes entre ellos y su principal función es hacer un seguimiento del comportamiento del parámetro de la variable en el tiempo. Las series de tiempo se caracterizan por tener componentes de tendencia (cambio a largo plazo para identificar un movimiento) y componentes estacionales (variación de ciertos periodos ya sean semestrales o mensuales). Las componentes de tendencia y estacionales son fáciles de medir, entender y si es necesario eliminar. Adicionalmente existen componentes aleatorios que se identifican porque no presentan ningún patrón de comportamiento (Villavicencio, 2010).

En el SGC – OVSM se utilizan las series de tiempo para analizar el comportamiento de todas las estaciones de monitoreo del VNR, incluidas las estaciones de deformación ya que son de gran utilidad para el manejo de los datos GNSS. Para el análisis de una serie de tiempo de datos GNSS del VNR es importante establecer una línea base de muchos años que permita evidenciar la estabilidad de una estación GNSS, la cual refleja la estabilidad de la roca y de los depósitos que conforman la estructura volcánica sobre la cual se montó la estación GNSS. Cuando se presenta un cambio deformativo de la estructura volcánica, este es reflejado como un cambio en la línea base, por consiguiente, se puede identificar en el tiempo la ocurrencia de un cambio deformativo y su evolución y de esa manera conocer el comportamiento de todo el edificio volcánico. Los cambios deformativos deben registrarse en muchas de las

estaciones instaladas alrededor del volcán, ya que un cambio registrado en una sola estación puede ser causado por un fenómeno local.

## **7.9 Correlación Estadística**

Una correlación estadística es la definición de dependencia o no dependencia, casual o no entre dos variables aleatorias. Una correlación define el grado en que dos variables están relacionadas linealmente. En la correlación se realiza la asociación de variables para definir su estabilidad o tendencia. La correlación permite medir el signo y magnitud de la estabilidad y tendencia entre las dos variables. La correlación se mide por el coeficiente de correlación lineal de Pearson que sirve para cuantificar tendencias lineales y el coeficiente de correlación de Spearman que se utiliza para tendencias de aumento o disminución (Canavos, 1988).

Estadísticamente al método de corrección por dispersiones se le llama análisis de regresión mediante diagramas de dispersión, el cual tiene como objetivo determinar una función matemática para describir el comportamiento de una variable, dados los valores de otra u otras variables (Canavos, 1988).

## 8. Metodología

### 8.1 Conversión Datos GNSS

Los archivos GNSS recibidos en el SGC - OVSM se encuentran originalmente en formato nativo T02, los cuales son archivos generados por las estaciones de marca Trimble. Estos son archivos de propietario en formato binario, muy compactos y contienen los datos de las pseudodistancias enviadas por la constelación GNSS, los datos de navegación de los satélites y de las condiciones meteorológicas que afectan a las señales satelitales.

Los archivos T02 (extensión “.t02”, Figura 29) se convierten a formato GNSS universal RINEX (Receiver INdependent EXchange format) por medio del programa Convert to RINEX Utility de TRIMBLE. Un archivo RINEX contiene datos crudos del sistema de navegación satelital GNSS en formato de intercambio independiente del receptor en un intervalo de tiempo específico (típicamente un día calendario).

La Comunidad Geodésica Internacional estableció como una necesidad prioritaria contar con archivos GNSS en formato universal RINEX para combinar datos de diferentes tipos de estaciones GNSS, diferentes marcas, modelos y versiones. De esta manera, en un proyecto GNSS, con un programa se puede procesar datos GNSS provenientes de diferentes estaciones, satisfaciendo la necesidad de intercambio de información GNSS. El formato universal RINEX permite convertir los datos GNSS binarios de cada marca, transformándolos a un formato de texto (ASCII) independiente y universal. La nomenclatura del formato RINEX se caracteriza por tener una estructura “ssssdddf.yyt”, donde los primeros cuatro caracteres “ssss” son para el nombre de la estación, los tres siguientes “ddd” para el día juliano, y el carácter “f” indica el número de la sesión. Los dos primeros caracteres de la

extensión “yy” corresponden al año en el cual se obtienen los datos y el último “t” indica el tipo de archivo; el cual puede ser: archivo observable (o), archivo de navegación (n) y archivo meteorológico (l) (Torrecillas y Martínez, 1999).

En los archivos de tipo observable (o) la pseudodistancia (medición del tiempo de propagación aparente desde el satélite al receptor GNSS, expresado como distancia) se mide en metros. Se aceptan tres tipos de pseudodistancias: la C1 (código C/A o estándar sobre la frecuencia L1), la P1 (Código P o Precise en L1) y la P2 (Código P en L2). La medición se puede realizar sobre las frecuencias L1 o L2 y se almacena en ciclos completos. En los primeros receptores GNSS la medida de la pseudodistancia se caracterizaba por ser de medio ciclo, obligando a convertir estos datos en ciclos completos. Ninguno de los datos observables debe ser corregido por sesgos externos tales como la refracción atmosférica o el retardo del reloj del satélite. Los archivos observables (o) pueden ser comprimidos (d) para generar archivos con la extensión “yyd”.

Los archivos de navegación (n) están constituidos por los datos de orbitales, los parámetros del reloj y las medidas de pseudodistancia de los satélites observados de la constelación GNSS GPS. Los archivos “g” contienen datos de navegación para las efemérides de la constelación GNSS GLONAS. Los archivos “l” contienen datos de navegación para las efemérides de la constelación GNSS GALILEO. Finalmente, los archivos meteorológicos (m) tienen como función la simplificación de la exportación y procesamiento de los distintos datos meteorológicos, conteniendo valores como la presión atmosférica en milibares, la temperatura seca y húmeda en grados Celsius, y la humedad relativa (Torrecillas y Martínez, 1999).

La herramienta “Convert to RINEX Utility” se puede descargar desde la página de UNAVCO (Consortio de Universidades NAVstar) y funciona en sistema operativo Windows. Luego de

instalar el programa mediante el instalador descargado, se puede utilizar el programa ejecutándolo, haciendo doble click sobre el icono de acceso directo. En el programa se escoge la opción “File” y luego “Open” para desplegar una ventana donde se busca la carpeta que contiene los archivos con extensión “.t02” que son los archivos de entrada. En esta ventana se pueden seleccionar varios archivos simultáneamente. Luego de cargar estos archivos, el programa comienza a escanearlos de forma automática y al terminar el proceso de análisis de cada archivo, se habilita un botón de color azul ubicado en la parte superior izquierda justo debajo de la opción “File”, el cual al ser pulsado da inicio al procesamiento de cada archivo para generar los archivos RINEX observables, navegables y meteorológicos. Este proceso puede tardar desde minutos para un solo archivo con un tamaño de 10 MB, hasta varias horas dependiendo de la cantidad de archivos y de su peso en MB. El tamaño de cada archivo depende de la tasa de rastreo configurada en los receptores (1 segundo o 30 segundos) y la disposición de satélites (Figura 30).

Nombre	Tipo	Tamaño
bis02880.t02	Archivo T02	14.656 KB
bllr2880.t02	Archivo T02	21.171 KB
gual2880.t02	Archivo T02	18.060 KB
inde2880.t02	Archivo T02	18.522 KB
lagu2880.t02	Archivo T02	9.729 KB
mral2880.t02	Archivo T02	19.378 KB
nere2880.t02	Archivo T02	20.585 KB
olle2880.t02	Archivo T02	23.567 KB
pira2880.t02	Archivo T02	22.477 KB
recm2880.t02	Archivo T02	22.053 KB
rubi2880.t02	Archivo T02	24.641 KB
secr2880.t02	Archivo T02	12.150 KB
sinn2880.t02	Archivo T02	17.971 KB

**Figura 29.** Archivos GNSS en formato T02 usados con el programa Convert to RINEX Utility.

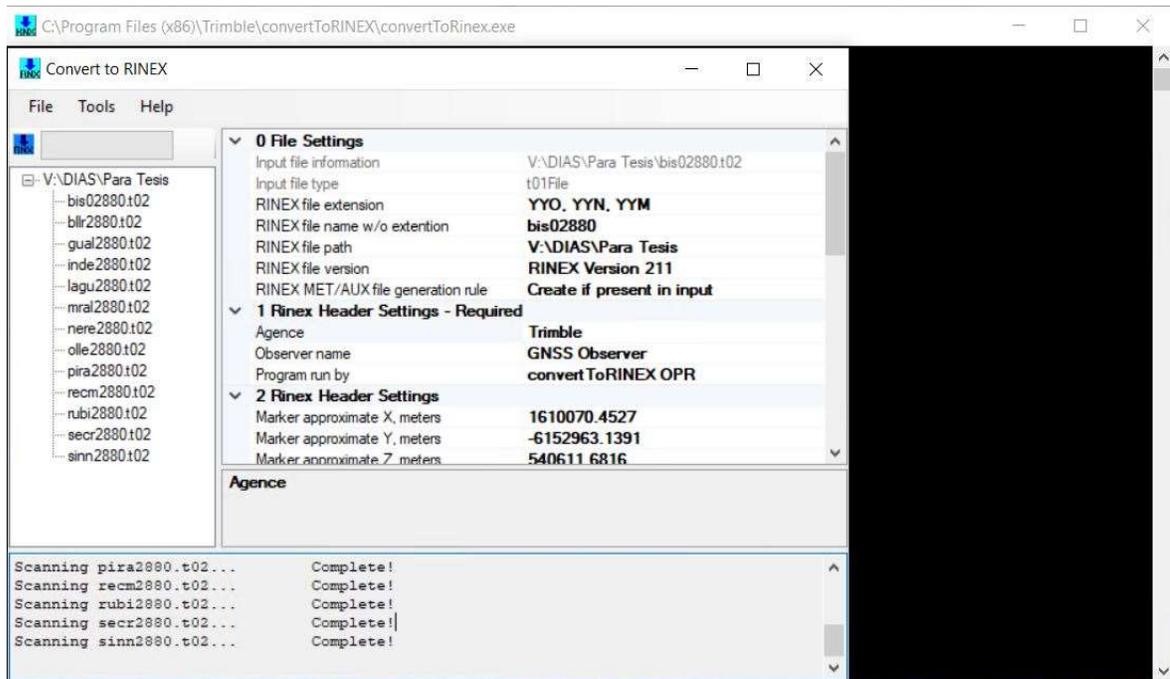


Figura 30. Programa Convert to RINEX empleado por el SGC - OVSM.

Al terminar el proceso de conversión de los archivos T02 a archivos en formato RINEX (Figura 31), se comprimen en formato ZIP, se almacenan en un servidor y se preparan para ser cargados al servidor en línea del CSRS.

Nombre	Tipo	Tamaño
▼ Archivo 210 (13)		
bis02880.21o	Archivo 210	97.297 KB
bllr2880.21o	Archivo 210	182.351 KB
gual2880.21o	Archivo 210	138.145 KB
inde2880.21o	Archivo 210	167.571 KB
lagu2880.21o	Archivo 210	80.393 KB
mrar2880.21o	Archivo 210	138.658 KB
nere2880.21o	Archivo 210	146.695 KB
olle2880.21o	Archivo 210	171.084 KB
pira2880.21o	Archivo 210	165.517 KB
recm2880.21o	Archivo 210	171.210 KB
rubi2880.21o	Archivo 210	178.809 KB
secr2880.21o	Archivo 210	118.143 KB
sinn2880.21o	Archivo 210	139.116 KB

**Figura 31.** Archivos GNSS en formato RINEX (observables) luego de ser procesados con el programa Convert to RINEX.

## 8.2 Sistema de Referencia Espacial Canadiense (CSRS)

El CSRS es una colección de estándares, modelos, productos de datos e infraestructura que respalda el posicionamiento geoespacial en Canadá. Incluye los sistemas de referencia geométrica, de Altura y de gravedad (CSRS, 2021).

En el Servicio Geodésico Canadiense se define, mantiene, mejora y facilita el acceso al Sistema de Referencia Espacial Canadiense (CSRS), que establece la referencia de latitud, longitud, Altura y gravedad en Canadá. En este servidor en línea cualquier usuario relacionado con la topografía, ingeniería y las geociencias puede confiar en el CSRS para

proporcionar un enfoque coherente para actividades como cartografía, topografía, ingeniería, gestión del agua y otras.

El CSRS proporciona una referencia geodésica coherente para datos GNSS recopilados en cualquier parte del mundo y en diferentes épocas, para brindar posiciones con alta precisión.

### **8.3 Procesamiento Datos GNSS**

El procesamiento de los datos GNSS de la red geodésica del VNR se hace mediante la página del servidor en línea del CSRS. El servicio del CSRS PPP (Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning) fue lanzado en 2003 y permite a usuarios de datos GNSS, acceder al servidor en línea mediante los servidores de Recursos Naturales de Canadá. Los usuarios cargan un archivo RINEX al servidor y reciben en minutos, un estimado de la posición o trayectoria con un estimado de calidad y un reporte visual para tener control de los datos (Banville, 2020).

El CSRS-PPP realiza correcciones precisas de los datos GNSS, empleando las órbitas de satélites y una red global de estaciones GNSS, para determinar las posiciones del usuario. Esta estrategia se diferencia de otros servicios de posicionamiento online basados en el posicionamiento diferencial, es decir, utilizando estaciones base cercanas. El CSRS-PPP permite obtener precisiones de nivel milimétrico para sesiones de observación prolongadas (más de 24 horas) en modo estático, pero normalmente se puede lograr una precisión de unos pocos centímetros con una hora de diferencia entre la toma de los datos y el procesamiento de estos (Banville, 2020).

La página del CSRS es una poderosa herramienta en línea, gratuita de post-procesamiento de datos geodésicos espaciales que usa información de estaciones GNSS de todo el mundo con alta precisión. El CSRS procesa los datos GNSS que son enviados por un usuario y arroja un archivo con la posición de una estación GNSS con gran precisión, que son administrados por el Servicio GNSS Internacional (IGS) y sus agencias asociadas (Dow et al., 2009).

CSRS-PPP usa la mejor información disponible de las efemérides para el periodo de tiempo en el que los datos del usuario fueron recolectados. El servicio CSRS-PPP provee tres niveles de precisión para sus soluciones, teniendo en cuenta las efemérides disponibles: ultra rápida, rápida y final con tiempos de espera de 90 minutos, 24 horas y 20 días respectivamente. Las soluciones rápidas y finales se caracterizan por tener más información y calidad en los resultados, a diferencia de las ultra-rápidas que tienen mayor incertidumbre, pero generalmente son aceptables para la mayoría de las aplicaciones donde se necesita información en casi tiempo real y con precisión menor (Donahue, 2017). Para obtener una posición, el usuario puede escoger entre el Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF) (Altamini et al., 2011) o en el Sistema de Referencia Espacial Canadiense NAD83 (NAD83 CSRS) (Craymer 2006a, b).

Un usuario debe ingresar a la página CSRS-PPP (<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>) (Figura 32) y crear una cuenta asociada a un correo electrónico (Figura 33). Una vez el usuario accede a través de la opción “Sing in” (Figura 32), debe escoger el modo de procesamiento ya sea cinemático o estático, además de seleccionar el marco o sistema de referencia (ITRF o NAD83). Posteriormente, el usuario debe cargar el archivo RINEX que desea procesar en formato: .yyo, .zip, .gz y .Z (Figura 34), teniendo en cuenta que su tamaño no debe ser superior a 300 MB (Figura 35). Luego de cargar el archivo, las soluciones ultra-rápidas, rápidas o finales llegaran al correo electrónico asociado a la cuenta, en formato PDF para su descarga y visualización (Figura 36).

The screenshot shows the top navigation bar of the Government of Canada website, including the Canadian flag, the text 'Government of Canada / Gouvernement du Canada', and a search box. Below the navigation is a breadcrumb trail: 'Canada.ca > Natural Resources Canada > Maps, Tools and Publications > Geodetic Reference Systems > Geodetic tools and data > Precise Point Positioning'. The main heading is 'Precise Point Positioning'. A light blue highlighted box contains the following text:

**i CSRS-PPP update – Automatic decimation of high-rate static submissions**

Beginning **Friday, March 26, 2021**, the CSRS-PPP service will automatically decimate high-rate static datasets to a data rate of 30 seconds. This will affect only **dual-frequency, static datasets containing both code and phase data** for which at least 75% of the expected 30 second intervals are available. For all other data sets, there will be no impact. To learn more about why this change is being made, and what the impacts may be on your submission, please visit the [CSRS-PPP modernization page](#).

**CSRS-PPP service upgrade from version 2 to version 3**

On **Tuesday, October 20, 2020 at 11:00 EDT**, the Canadian Geodetic Survey of Natural Resources Canada updated the Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning (CSRS-PPP) service. This CSRS-PPP modernization includes PPP with ambiguity resolution (PPP-AR) for **data collected on or after 1 January 2018**. Data collected prior to this date will continue to be processed with the IGS final products without ambiguity resolution. For more information, please visit the [CSRS-PPP modernization page](#) or download the [tutorial](#) describing the changes.

[Sign in](#) to access this page.

Use of Canadian Geodetic Survey products and data is subject to the [Open Government Licence - Canada](#)

[Geodetic Reference Systems Information](#)

Report a problem or mistake on this page

Date modified: 2021-10-25

Figura 32. Pagina del CSRS PPP.

Fransais

Government of Canada / Gouvernement du Canada

Search the website

MENU

Canada.ca > Natural Resources Canada > Maps, Tools and Publications > Geodetic Reference Systems > Geodetic tools and data > Sign in

## Sign in

Email (username)  
deformacionovsm@gmail.com

Password  
\*\*\*\*\*

Remember me

Sign in

[New User: Create an account!](#)

[Forgot Password?](#)

Use of Canadian Geodetic Survey products and data is subject to the [Open Government Licence - Canada](#)  
[Geodetic Reference Systems Information](#)

Report a problem or mistake on this page

Date modified: 2020-08-07

Contact us | News | Prime Minister  
Departments and agencies | Treaties, laws and regulations | About government  
Public service and military | Government-wide reporting | Open government

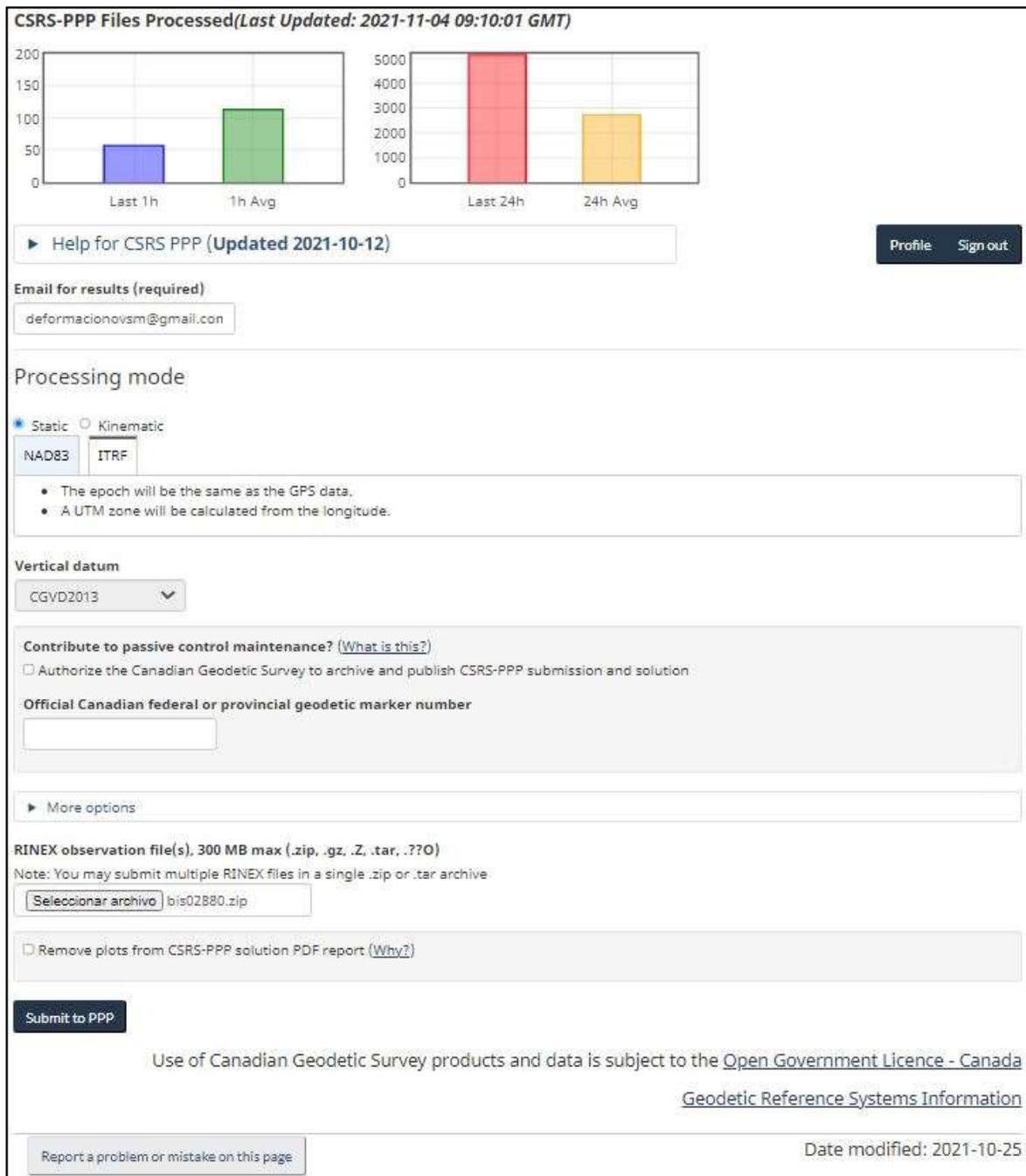
Social media • Mobile applications • About Canada.ca • Terms and conditions • Privacy

Canada

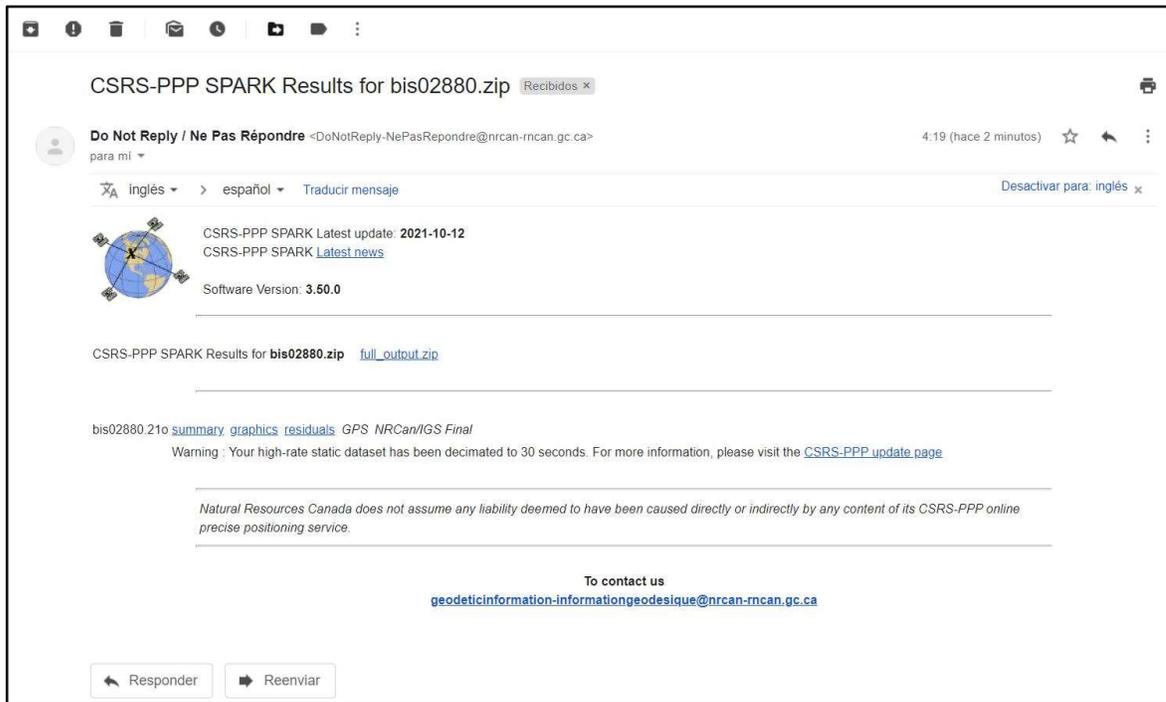
**Figura 33.** Ingreso a la plataforma con la cuenta creada en el CSRS PPP.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
bis02880.zip	04/11/2021 4:14 a....	Archivo WinRAR ZIP	28.273 KB
bis02880.21o	04/11/2021 3:22 a....	Archivo 21O	97.297 KB

**Figura 34.** Archivo RINEX comprimido en formato .zip para ser cargado en el CSRS PPP.

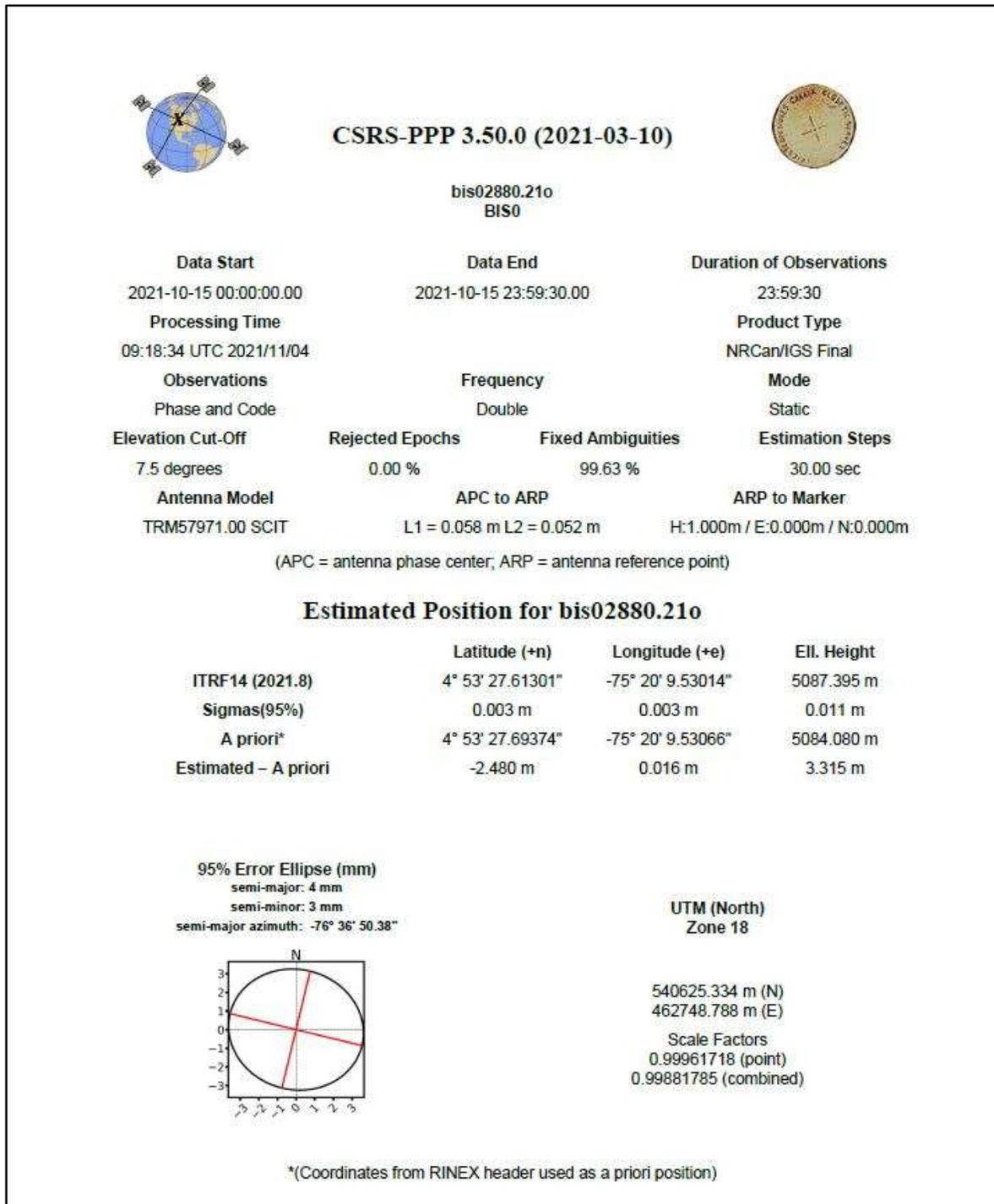


**Figura 35.** Página de la herramienta de postprocesamiento del CSRS PPP donde se cargan los archivos GNSS en formato .zip, en el modo de procesamiento estatico y bajo el marco de referencia ITRF.



**Figura 36.** Información que llega al correo asociado desde donde se puede descargar las soluciones en orbitas finales, rápidas y ultra-rápidas.

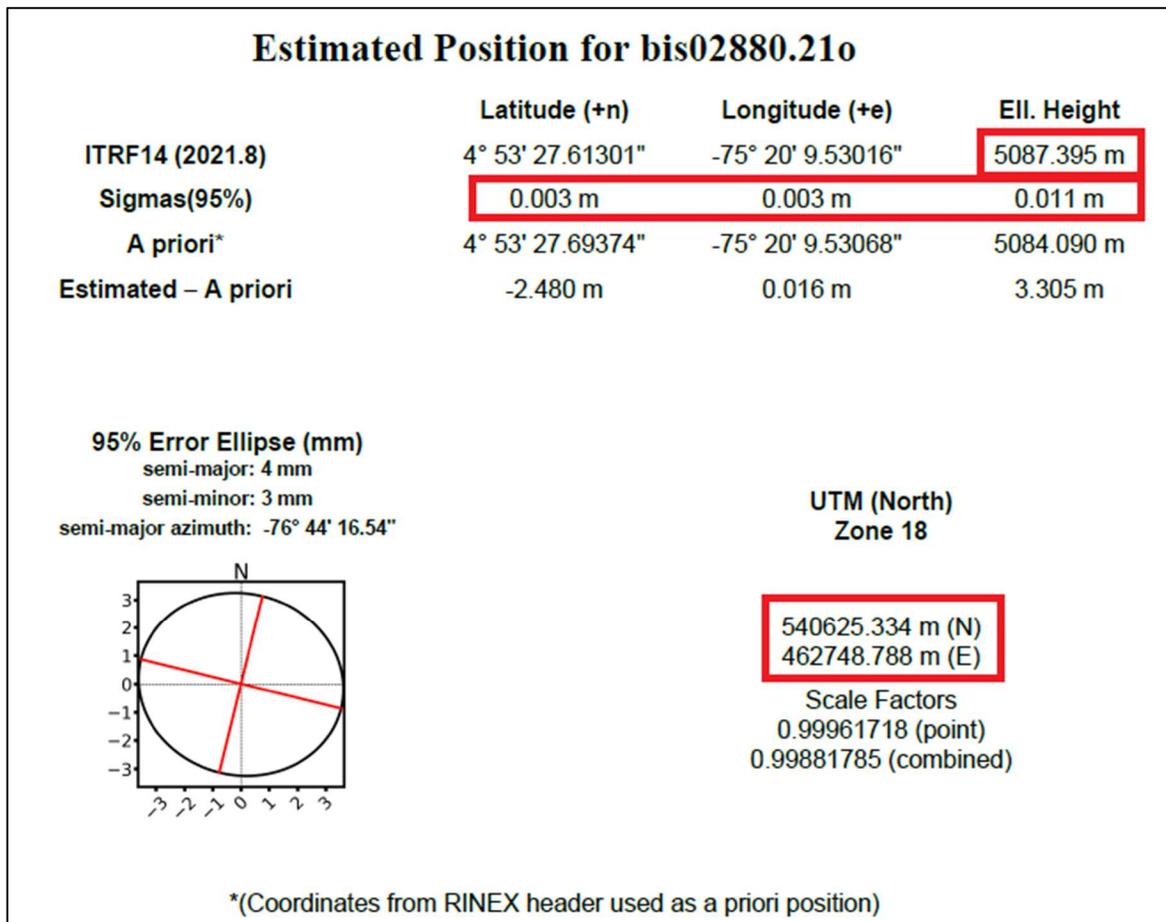
Luego de descargar el archivo con las soluciones dadas por el CSRS PPP en formato PDF, se extrae la información correspondiente a la posición de la estación con las coordenadas Norte, Este, Altura y la desviación estándar (Sistema de coordenadas geográficas UTM Norte Zona 18, Figura 37).



**Figura 37.** Primera página del reporte de soluciones del CSRS PPP del cual se extraen las coordenadas Norte, Este y la Altura..

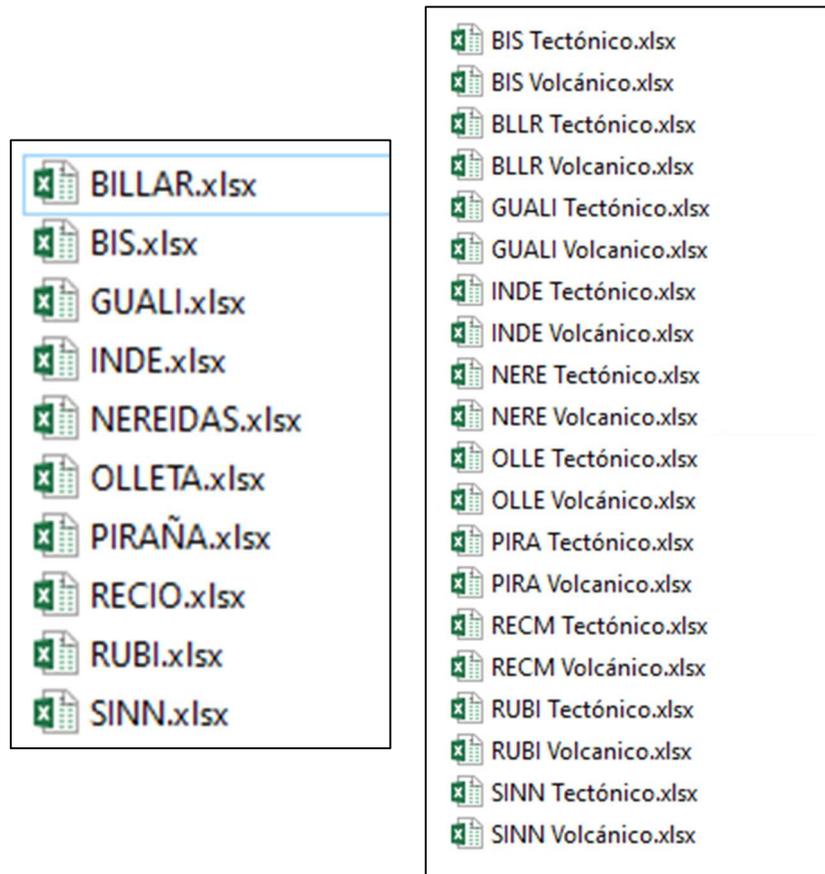
## 8.4 Alimentación Bases de Datos GNSS

Al descargar el archivo PDF de las estaciones GNSS de las redes de deformación de los SVNC (con las soluciones ultra rápidas, rápidas o finales), se almacena en el repositorio del SGC – OVSM y se extraen los datos de las coordenadas Este y Norte obtenidas bajo el sistema de coordenadas geográficas UTM Norte Zona 18, la Altura calculada a través del marco de referencia ITRF14 y las desviaciones estándar (Sigma) para las tres componentes (Figura 38).



**Figura 38.** Información contenida dentro del PDF obtenido a través del CSRS PPP, del cual se extrae la información marcada por los recuadros de color rojo.

Los datos extraídos de las coordenadas con su desviación estándar para cada estación GNSS se almacenan en una hoja de cálculo elaborada con el programa Excel (archivos Excel, Figura 39). Teniendo en cuenta que para el monitoreo volcánico se necesitan obtener los resultados en tiempo casi real, se realiza un procesamiento diario usando los datos de los archivos GNSS del día anterior generados a las 7:00 pm de cada día (grabados a las 24 horas en el tiempo UTC) y tomando como referencia las orbitas ultra rápidas y rápidas. Cada hoja de cálculo que contiene los datos de las coordenadas se nombra de acuerdo con el nombre de la estación GNSS (Figura 39) y se almacenan en una carpeta que se denomina “PROCESAMIENTO”. Para verificar los resultados obtenidos en tiempo casi real (orbitas ultra-rápidas y rápidas) y obtener mayor precisión en las coordenadas de cada estación GNSS, se realiza un post-procesamiento empleando las orbitas finales que se obtienen 20 días después de la toma del dato por la estación GNSS. Los datos del post-procesamiento se almacenan en otras hojas de cálculo y en la carpeta que se denomina “POSTPROCESAMIENTO”, generando un archivo para cada estación GNSS con los datos que se reciben directamente del CSRS los cuales incluyen el comportamiento tectónico y otro archivo Excel donde se aplica un filtro para remover el efecto tectónico y obtener el comportamiento volcánico (Figura 39).



**Figura 39.** Archivos Excel en los cuales se organizan y almacenan los datos para cada estación GNSS. A la izquierda se muestran los archivos procesados con orbitas ultra-rápidas y rápidas, y a la derecha los archivos post-procesados con las orbitas finales que tienen un retraso promedio de 20 días, tanto para los archivos tectónicos como para los archivos volcánicos.

Los archivos Excel generados a partir de los datos obtenidos del procesamiento con orbitas ultra-rápidas y rápidas se almacenan en un servidor del SGC – OVSM en una carpeta denominada “PROCESAMIENTO”. Para cada estación GNSS se genera un archivo Excel con dos hojas de cálculo: una para el comportamiento tectónico y otra para el volcánico. Adicionalmente se crean subcarpetas donde se almacenan por años los archivos RINEX, T02, ZIP y PDF respectivamente. Los archivos Excel generados a partir de los datos obtenidos del post-procesamiento con orbitas finales se almacenan en la carpeta denominada

“POSTPROCESAMIENTO”, donde se incluyen los archivos PDF y dos archivos Excel: uno para el comportamiento tectónico y otro para el volcánico (Figura 40).



**Figura 40.** A: estructura general donde se almacenan en carpetas los archivos GNSS por código de la estación. B: información almacenada dentro de la carpeta BIS0. C: archivos almacenados dentro de las carpeta correspondiente de a su año de adquisición. D: información almacenada dentro de la carpeta POSTPROCESAMIENTO correspondiente a todos los datos obtenidos en orbitas finales.

Dentro de los archivos Excel se ordenan los datos usando un mismo formato para todas las estaciones GNSS. Para los archivos Excel creados a partir del procesamiento mediante las orbitas ultra-rápidas y rápidas se utiliza el formato que se muestra en la Figura 41. Para los archivos creados a partir del procesamiento mediante las orbitas finales y que tienen el comportamiento tectónico se utiliza el formato que se observa en la Figura 42. Para los archivos Excel que tienen la corrección tectónica para determinar el comportamiento volcánico se usa el formato mostrado en la Figura 43.

ID		BIS											
Servicio		CSRS-PPP											
Volcán		Nevado del Ruiz											
Altura Antena (m)		5086,0											
Procesamiento		<a href="http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php">http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php</a>											
FECHA	DÍA JULIANO	ORIGINALES			ORIGINALES/1000			ERRORES			DIFERENCIAS BISO		
		E (m)	N (m)	U (m)	E (m)	N (m)	U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)
12/05/2017	132	462748777	540625267	5087408	462748,777	540625,267	5087,408	0,011	0,003	0,017			
13/05/2017	133	462748771	540625257	5087380	462748,771	540625,257	5087,380	0,004	0,001	0,008			
14/05/2017	134	462748771	540625260	5087381	462748,771	540625,260	5087,381	0,004	0,001	0,008	0,000	0,003	0,001
15/05/2017	135	462748765	540625257	5087374	462748,765	540625,257	5087,374	0,005	0,001	0,008	-0,006	0,000	-0,006
16/05/2017	136	462748765	540625257	5087378	462748,765	540625,257	5087,378	0,005	0,001	0,008	-0,006	0,000	-0,002
17/05/2017	137	462748768	540625257	5087376	462748,768	540625,257	5087,376	0,004	0,001	0,008	-0,003	0,000	-0,004
18/05/2017	138	462748768	540625257	5087371	462748,768	540625,257	5087,371	0,005	0,001	0,009	-0,003	0,000	-0,009
19/05/2017	139	462748762	540625254	5087373	462748,762	540625,254	5087,373	0,004	0,001	0,009	-0,009	-0,003	-0,007
20/05/2017	140	462748762	540625257	5087373	462748,762	540625,257	5087,373	0,005	0,001	0,008	-0,009	0,000	-0,007
21/05/2017	141	462748765	540625254	5087366	462748,765	540625,254	5087,366	0,006	0,002	0,010	-0,006	-0,003	
22/05/2017	142	462748768	540625257	5087375	462748,768	540625,257	5087,375	0,004	0,001	0,008	-0,003	0,000	-0,005
23/05/2017	143	462748765	540625257	5087370	462748,765	540625,257	5087,370	0,004	0,001	0,008	-0,006	0,000	
24/05/2017	144	462748765	540625260	5087376	462748,765	540625,260	5087,376	0,005	0,001	0,010	-0,006	0,003	-0,004
25/05/2017	145	462748771	540625257	5087372	462748,771	540625,257	5087,372	0,005	0,002	0,010	0,000	0,000	-0,008
26/05/2017	146	462748771	540625257	5087376	462748,771	540625,257	5087,376	0,005	0,001	0,008	0,000	0,000	-0,004
27/05/2017	147	462748774	540625254	5087378	462748,774	540625,254	5087,378	0,004	0,001	0,008	0,003	-0,003	-0,002

Figura 41. Formato utilizado en la hoja de cálculo para los datos obtenidos mediante orbitas ultra-rápidas y rápidas.

ID		BISO										
Servicio		CSRS - PPP										
Volcán		VNR										
Altura Antena (m)		5086										
FECHA	DÍA JULIANO	ORIGINALES/1000			ERRORES			DIFERENCIAS BISO			Tipo de órbita	
		E (m)	N (m)	U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)		
12/05/2017	132	462748,773	540625,264	5087,381	0,019	0,005	0,023	0,000	0,000	0,000	Final	
13/05/2017	133	462748,764	540625,260	5087,374	0,006	0,002	0,011	-0,009	-0,004	-0,007	Final	
14/05/2017	134	462748,761	540625,260	5087,375	0,006	0,002	0,011	-0,012	-0,004	-0,006	Final	
15/05/2017	135	462748,764	540625,260	5087,369	0,006	0,002	0,011	-0,009	-0,004	-0,012	Final	
16/05/2017	136	462748,764	540625,259	5087,376	0,006	0,002	0,011	-0,009	-0,005	-0,005	Final	
17/05/2017	137	462748,768	540625,258	5087,372	0,006	0,002	0,011	-0,005	-0,006	-0,009	Final	
18/05/2017	138	462748,762	540625,261	5087,365	0,006	0,003	0,011	-0,011	-0,003	-0,016	Final	
19/05/2017	139	462748,764	540625,261	5087,368	0,006	0,003	0,011	-0,009	-0,003	-0,013	Final	
20/05/2017	140	462748,764	540625,260	5087,369	0,006	0,002	0,011	-0,009	-0,004	-0,012	Final	
21/05/2017	141	462748,765	540625,262	5087,371	0,006	0,002	0,011	-0,008	-0,002	-0,010	Final	
22/05/2017	142	462748,766	540625,260	5087,372	0,006	0,002	0,011	-0,007	-0,004	-0,009	Final	
23/05/2017	143	462748,763	540625,260	5087,367	0,006	0,002	0,011	-0,010	-0,004	-0,014	Final	
24/05/2017	144	462748,765	540625,263	5087,373	0,006	0,002	0,011	-0,008	-0,001	-0,008	Final	
25/05/2017	145	462748,765	540625,259	5087,369	0,006	0,002	0,011	-0,008	-0,005	-0,012	Final	
26/05/2017	146	462748,764	540625,262	5087,369	0,006	0,002	0,011	-0,009	-0,002	-0,012	Final	
27/05/2017	147	462748,770	540625,261	5087,371	0,006	0,002	0,011	-0,003	-0,003	-0,010	Final	

Figura 42. Formato utilizado en la hoja de cálculo para los datos obtenidos mediante orbitas finales sin corrección tectónica.

ID		BISO														
Servicio		CSRS - PPP														
Volcán		VNR														
Altura Antena (m)		5086														
Procesamiento		<a href="http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outputs/ppp.php">http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outputs/ppp.php</a>														
		PENDIENTE E					PENDIENTE N					PENDIENTE U				
		INTERSECCION E					INTERSECCION N					INTERSECCION U				
		1,1071					1,1709					0,5586				
		-0,0115					-0,0543					0,0019				
FECHA	DÍA JULIANO	DIFERENCIAS BISO			ERRORES			DIFERENCIAS SECR			ERRORES			BISO CORREGIDAS SECR		
		D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)
12/05/2017	132	0,000	0,000	0,000	0,019	0,005	0,023	0,010	0,041	-0,008	0,006	0,002	0,010	-0,023	-0,102	0,003
13/05/2017	133	-0,009	-0,004	-0,007	0,006	0,002	0,011	0,006	0,039	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,027	-0,104	-0,004
14/05/2017	134	-0,012	-0,004	-0,006	0,006	0,002	0,011	0,006	0,041	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,001
15/05/2017	135	-0,009	-0,004	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,009	0,039	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,104	-0,007
16/05/2017	136	-0,009	-0,005	-0,005	0,006	0,002	0,011	0,009	0,040	-0,008	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,002
17/05/2017	137	-0,005	-0,006	-0,009	0,006	0,002	0,011	0,012	0,039	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,006
18/05/2017	138	-0,011	-0,003	-0,016	0,006	0,003	0,011	0,009	0,039	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,032	-0,103	-0,012
19/05/2017	139	-0,009	-0,003	-0,013	0,006	0,003	0,011	0,010	0,041	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,032	-0,105	-0,008
20/05/2017	140	-0,009	-0,004	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,011	0,038	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,033	-0,103	-0,008
21/05/2017	141	-0,008	-0,002	-0,010	0,006	0,002	0,011	0,010	0,039	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,031	-0,102	-0,005
22/05/2017	142	-0,007	-0,004	-0,009	0,006	0,002	0,011	0,007	0,040	-0,013	0,006	0,002	0,010	-0,026	-0,105	-0,004
23/05/2017	143	-0,010	-0,004	-0,014	0,006	0,002	0,011	0,011	0,040	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,034	-0,105	-0,010
24/05/2017	144	-0,008	-0,001	-0,008	0,006	0,002	0,011	0,010	0,038	-0,008	0,006	0,002	0,011	-0,031	-0,101	-0,005
25/05/2017	145	-0,008	-0,005	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,014	0,040	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,035	-0,106	-0,009
26/05/2017	146	-0,009	-0,002	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,013	0,040	-0,011	0,006	0,002	0,010	-0,035	-0,103	-0,008
27/05/2017	147	-0,003	-0,003	-0,010	0,006	0,002	0,011	0,011	0,042	-0,001	0,006	0,002	0,010	-0,027	-0,106	-0,011

**Figura 43.** Formato utilizado en la hoja de cálculo para los datos obtenidos mediante orbitas finales corregidos tectónicamente para determinar el comportamiento volcánico.

## 8.5 Generación Series de Tiempo del VNR con Influencia Tectónica

Los datos GNSS obtenidos a partir del procesamiento con orbitas ultra-rápidas y rápidas, así como del post-procesamiento con orbitas finales están afectados por diferentes factores como: las condiciones climáticas, la deriva de los instrumentos y las mareas terrestres que producen cambios muy pequeños; y principalmente por el efecto tectónico que genera cambios del orden centimétrico. Como el objetivo del empleo de las estaciones GNSS para el monitoreo volcánico es determinar la deformación, la remoción del efecto tectónico es el factor más importante que se considera.

Inicialmente se realizan series de tiempo graficando los datos a partir de la resta del primer dato con los datos de cada estación GNSS de cada día (para el procesamiento y para el post-procesamiento).

Estas series de tiempo tienen la influencia tectónica y se realizan así:

$$d_1 = x_1 - x_1$$

$$d_2 = x_2 - x_1$$

$$d_3 = x_3 - x_1$$

$$d_4 = x_4 - x_1$$

...

$$d_i = x_i - x_1$$

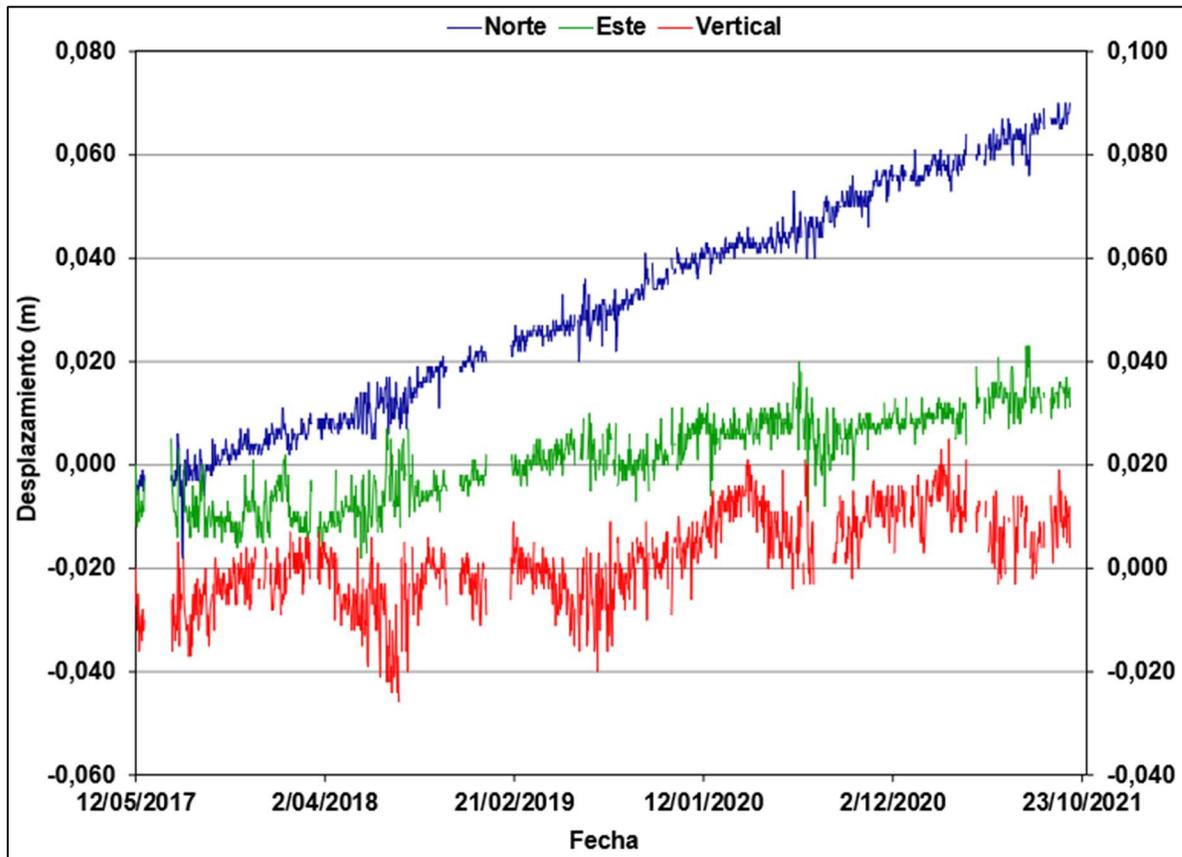
Donde:

- $d_i$  es la diferencia de los datos.
- $x_i$  es el dato de la posición (Norte, Este o Altura) obtenido para cada día.
- $x_1$  es el primer dato de la posición (Norte, Este o Altura) obtenido para esa estación GNSS.

Este cálculo se realiza para las componentes Norte, Este y Altura (Figura 44). “ $d_i$ ” es el valor que se utiliza como dato de entrada junto con su fecha de registro para realizar las series de tiempo ya sea para datos obtenidos por orbitas ultra-rápidas y rápidas, o por orbitas finales. Al obtener el “ $d_i$ ” de cada día se crea la serie de tiempo de tipo línea en donde se relaciona en el eje X la variable tiempo y en el eje Y los “ $d_i$ ” para las componentes Norte, Este y Altura (Figura 45).

SUMA												
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	<b>ID</b>	BISO										
2	<b>Servicio</b>	CSRS - PPP										
3	<b>Volcán</b>	VNR										
4	<b>Altura Antena (m)</b>	5086										
FECHA	DÍA JULIANO	ORIGINALES/1000			ERRORES			DIFERENCIAS BISO			Tipo de órbita	
		E (m)	N (m)	U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)		
7	12/05/2017	132	462748,773	540625,264	5087,381	0,019	0,005	0,023	0,000	0,000	0,000	Final
8	13/05/2017	133	462748,764	540625,260	5087,374	0,006	0,002	0,011	-0,009	-0,004	-0,007	Final
9	14/05/2017	134	462748,761	540625,260	5087,375	0,006	0,002	0,011	-0,012	-0,004	-0,006	Final
10	15/05/2017	135	462748,764	540625,260	5087,369	0,006	0,002	0,011	-0,009	-0,004	-0,012	Final
11	16/05/2017	136	462748,764	540625,259	5087,376	0,006	0,002	0,011	-0,009	=D11-\$D\$7	-0,005	Final
12	17/05/2017	137	462748,768	540625,258	5087,372	0,006	0,002	0,011	-0,005	-0,006	-0,009	Final
13	18/05/2017	138	462748,762	540625,261	5087,365	0,006	0,003	0,011	-0,011	-0,003	-0,016	Final
14	19/05/2017	139	462748,764	540625,261	5087,368	0,006	0,003	0,011	-0,009	-0,003	-0,013	Final
15	20/05/2017	140	462748,764	540625,260	5087,369	0,006	0,002	0,011	-0,009	-0,004	-0,012	Final
16	21/05/2017	141	462748,765	540625,262	5087,371	0,006	0,002	0,011	-0,008	-0,002	-0,010	Final
17	22/05/2017	142	462748,766	540625,260	5087,372	0,006	0,002	0,011	-0,007	-0,004	-0,009	Final
18	23/05/2017	143	462748,763	540625,260	5087,367	0,006	0,002	0,011	-0,010	-0,004	-0,014	Final
19	24/05/2017	144	462748,765	540625,263	5087,373	0,006	0,002	0,011	-0,008	-0,001	-0,008	Final
20	25/05/2017	145	462748,765	540625,259	5087,369	0,006	0,002	0,011	-0,008	-0,005	-0,012	Final
21	26/05/2017	146	462748,764	540625,262	5087,369	0,006	0,002	0,011	-0,009	-0,002	-0,012	Final
22	27/05/2017	147	462748,770	540625,261	5087,371	0,006	0,002	0,011	-0,003	-0,003	-0,010	Final
23	28/05/2017	148										
24	29/05/2017	149										
25	30/05/2017	150										
26	31/05/2017	151										

Figura 44. El recuadro rojo muestra la ecuación para obtener las diferencias ( $d_i$ ) de cada estación GNSS.



**Figura 45.** Serie de tiempo de la estación GNSS BIS0 para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento mediante orbitas ultra-rápidas y rápidas. Se evidencia claramente el comportamiento tectónico del bloque donde esta construida la estación con direccion NNE.

## 8.6 Correlación entre Estaciones GNSS

Para generar las series de tiempo corregidas (ya sea para datos obtenidos mediante orbitas ultra-rápidas y rápidas, así como finales) se utiliza el método de correlación estadística. Primero se establece una estación GNSS de referencia que no esté afectada por deformación volcánica. Posteriormente se genera una serie de tiempo graficando en el eje X las componentes Norte, Este y Altura de la estación GNSS de referencia y en el eje Y las componentes Norte, Este y Altura para cada estación GNSS de interés. A partir de esta

estrategia se obtiene una serie de tiempo a partir de la cual se calcula la ecuación de la línea que correlaciona estas dos estaciones GNSS. Esta ecuación se obtiene a partir de la pendiente de cada variable y de su punto de intersección con el eje Y. La ecuación de la línea tiene la siguiente estructura:

$$y = mx \pm b$$

Donde:

- $y$  es la variable dependiente (estación GNSS con deformación volcánica).
- $m$  es la pendiente de la recta.
- $x$  es la variable independiente (estación GNSS sin deformación volcánica).
- $b$  es la intersección de la recta con el eje  $y$ .

La pendiente ( $m$ ) y la intersección con el eje Y ( $b$ ) se puede obtener de manera gráfica y aritmética por medio de las funciones del programa Excel que se pueden ejecutar en la hoja de cálculo. Las funciones que se utilizan para calcular  $m$  y  $b$  en la hoja de cálculo Excel son:

$$fx = pendiente(conocido_y; conocido_x)$$

$$fx = interseccion.eje(conocido_y; conocido_x)$$

Para ambas funciones, en el término  $conocido_y$  se selecciona el rango de valores pertenecientes a la componente Norte, Este o Altura de la estación GNSS que se desea correlacionar (estaciones GNSS volcánicas). En el término  $conocido_x$  se selecciona el rango de valores pertenecientes a la misma componente (Norte, Este y Altura) de la estación GNSS de referencia (estación GNSS tectónica). Se debe seleccionar para los dos términos el mismo rango de valores, empezando y terminando en los mismos términos. En las Figuras 46 y 47 se muestran las funciones para obtener la pendiente y la intersección con el eje Y, aplicadas

para los datos de la estación GNSS BIS0 de la red del VNR y tomando como referencia la estación GNSS SECR de la red del VCM que no registra deformación volcánica.

M3 :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1		ID		BIS0													
2		Servicio		CSRS - PPP													
3		Volcán		VNR								PENDIENTE E	1,1071	PENDIENTE N	1,1709	PENDIENTE U	0,5586
4		Altura Antena (m)		5086								INTERSECCION E	-0,0115	INTERSECCION N	-0,0543	INTERSECCION U	0,0019
5		Procesamiento		<a href="http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-ouils/ppp.php">http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-ouils/ppp.php</a>													
7	FECHA	DÍA JULIANO	DIFERENCIAS BIS0			ERRORES			DIFERENCIAS SECR			ERRORES			BIS0 CORREGIDAS		
8			D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)
9	12/05/2017	132	0,000	0,000	0,000	0,019	0,005	0,023	0,010	0,041	-0,008	0,006	0,002	0,010	-0,023	-0,102	0,003
10	13/05/2017	133	-0,009	-0,004	-0,007	0,006	0,002	0,011	0,006	0,039	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,027	-0,104	-0,004
11	14/05/2017	134	-0,012	-0,004	-0,006	0,006	0,002	0,011	0,006	0,041	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,001
12	15/05/2017	135	-0,009	-0,004	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,009	0,039	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,104	-0,007
13	16/05/2017	136	-0,009	-0,005	-0,005	0,006	0,002	0,011	0,009	0,040	-0,008	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,002
14	17/05/2017	137	-0,005	-0,006	-0,009	0,006	0,002	0,011	0,012	0,039	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,006
15	18/05/2017	138	-0,011	-0,003	-0,016	0,006	0,003	0,011	0,009	0,039	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,032	-0,103	-0,012
16	19/05/2017	139	-0,009	-0,003	-0,013	0,006	0,003	0,011	0,010	0,041	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,032	-0,105	-0,008
17	20/05/2017	140	-0,009	-0,004	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,011	0,038	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,033	-0,103	-0,008
18	21/05/2017	141	-0,008	-0,002	-0,010	0,006	0,002	0,011	0,010	0,039	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,031	-0,102	-0,005
19	22/05/2017	142	-0,007	-0,004	-0,009	0,006	0,002	0,011	0,007	0,040	-0,013	0,006	0,002	0,010	-0,026	-0,105	-0,004
20	23/05/2017	143	-0,010	-0,004	-0,014	0,006	0,002	0,011	0,011	0,040	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,034	-0,105	-0,010
21	24/05/2017	144	-0,008	-0,001	-0,008	0,006	0,002	0,011	0,010	0,038	-0,008	0,006	0,002	0,011	-0,031	-0,100	-0,005
22	25/05/2017	145	-0,008	-0,005	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,014	0,040	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,035	-0,106	-0,009
23	26/05/2017	146	-0,009	-0,002	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,013	0,040	-0,011	0,006	0,002	0,010	-0,035	-0,103	-0,008
24	27/05/2017	147	-0,003	-0,003	-0,010	0,006	0,002	0,011	0,011	0,042	-0,001	0,006	0,002	0,010	-0,027	-0,106	-0,011

Figura 46. Función para calcular la pendiente de la correlación entre las estaciones GNSS BIS0 y SECR.

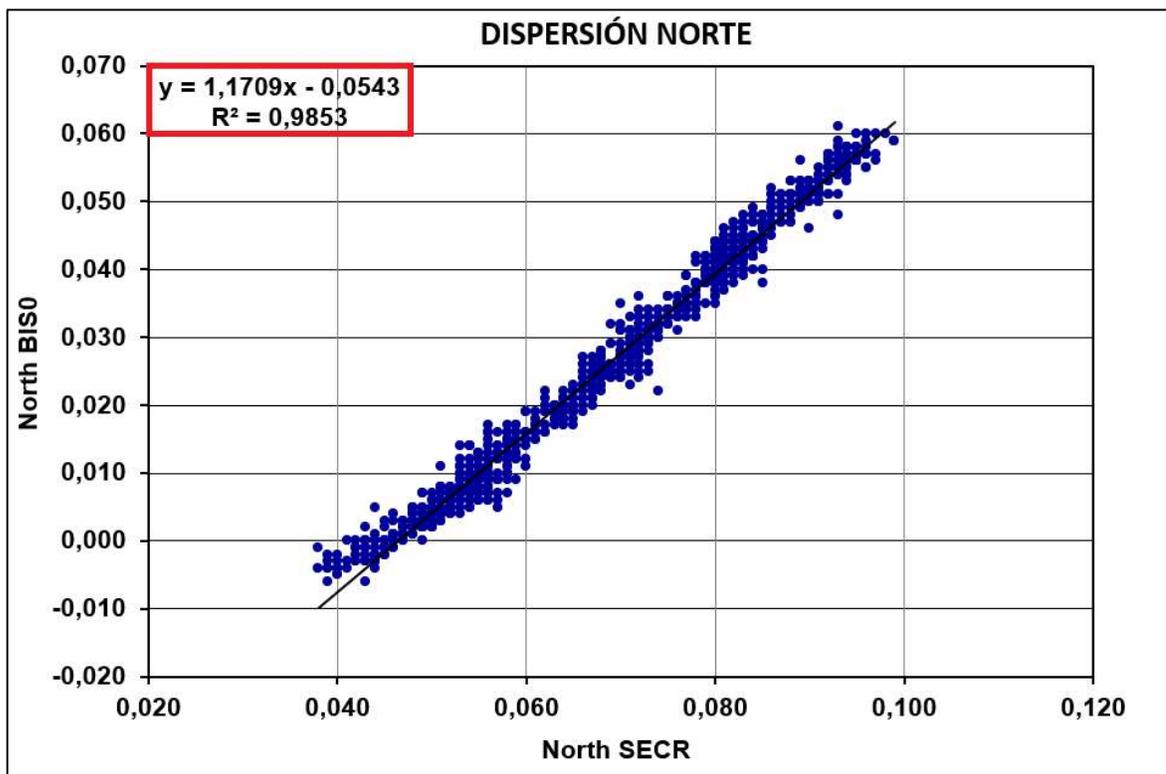
M4 :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1		ID		BIS0													
2		Servicio		CSRS - PPP													
3		Volcán		VNR								PENDIENTE E	1,1071	PENDIENTE N	1,1709	PENDIENTE U	0,5586
4		Altura Antena (m)		5086								INTERSECCION E	-0,0115	INTERSECCION N	-0,0543	INTERSECCION U	0,0019
5		Procesamiento		<a href="http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-ouils/ppp.php">http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-ouils/ppp.php</a>													
7	FECHA	DÍA JULIANO	DIFERENCIAS BIS0			ERRORES			DIFERENCIAS SECR			ERRORES			BIS0 CORREGIDAS		
8			D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)
9	12/05/2017	132	0,000	0,000	0,000	0,019	0,005	0,023	0,010	0,041	-0,008	0,006	0,002	0,010	-0,023	-0,102	0,003
10	13/05/2017	133	-0,009	-0,004	-0,007	0,006	0,002	0,011	0,006	0,039	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,027	-0,104	-0,004
11	14/05/2017	134	-0,012	-0,004	-0,006	0,006	0,002	0,011	0,006	0,041	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,001
12	15/05/2017	135	-0,009	-0,004	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,009	0,039	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,104	-0,007
13	16/05/2017	136	-0,009	-0,005	-0,005	0,006	0,002	0,011	0,009	0,040	-0,008	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,002
14	17/05/2017	137	-0,005	-0,006	-0,009	0,006	0,002	0,011	0,012	0,039	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,006
15	18/05/2017	138	-0,011	-0,003	-0,016	0,006	0,003	0,011	0,009	0,039	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,032	-0,103	-0,012
16	19/05/2017	139	-0,009	-0,003	-0,013	0,006	0,003	0,011	0,010	0,041	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,032	-0,105	-0,008
17	20/05/2017	140	-0,009	-0,004	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,011	0,038	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,033	-0,103	-0,008
18	21/05/2017	141	-0,008	-0,002	-0,010	0,006	0,002	0,011	0,010	0,039	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,031	-0,102	-0,005
19	22/05/2017	142	-0,007	-0,004	-0,009	0,006	0,002	0,011	0,007	0,040	-0,013	0,006	0,002	0,010	-0,026	-0,105	-0,004
20	23/05/2017	143	-0,010	-0,004	-0,014	0,006	0,002	0,011	0,011	0,040	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,034	-0,105	-0,010
21	24/05/2017	144	-0,008	-0,001	-0,008	0,006	0,002	0,011	0,010	0,038	-0,008	0,006	0,002	0,011	-0,031	-0,100	-0,005
22	25/05/2017	145	-0,008	-0,005	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,014	0,040	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,035	-0,106	-0,009
23	26/05/2017	146	-0,009	-0,002	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,013	0,040	-0,011	0,006	0,002	0,010	-0,035	-0,103	-0,008
24	27/05/2017	147	-0,003	-0,003	-0,010	0,006	0,002	0,011	0,011	0,042	-0,001	0,006	0,002	0,010	-0,027	-0,106	-0,011

Figura 47. Función para calcular la intersección con el eje Y de la correlación entre las estaciones GNSS BIS0 y SECR.

Las series de tiempo para calcular la correlación se realizan para cada componente (Norte, Este y Altura) de forma independiente y deben ser de tipo dispersión para considerar los mismos periodos de tiempo de cada estación GNSS. Se debe tener especial cuidado en

conservar los mismo rangos, dato inicial y dato final para cada componente para asegurar una correlación consistente en el tiempo. El resultado que se obtiene de la correlación es una serie de tiempo en donde cada punto de la gráfica muestra la dispersión para las dos estaciones para cada día. La serie de tiempo muestra una cantidad significativa de datos que se conoce como nube de datos, a la cual se le puede adaptar una línea que representa la tendencia de los datos y calcular su ecuación, de la que se despejan las variables dependiente, independiente,  $m$  y  $b$ . Adicionalmente, se puede calcular el coeficiente de correlación de las dos variables ( $R^2$ ) que es una medida del porcentaje de asociación o correlación (Figura 48).



**Figura 48.** Serie de tiempo de la dispersión obtenida mediante el cruce de la variable independiente (componente Norte de la estación SECR) con la variable dependiente (componente Norte de la estación BISO). La línea de color negro representa la línea de tendencia para la ecuación de la recta Y y su porcentaje de correlación  $R^2$ . Para esta correlación el  $R^2$  es 0.9853 que corresponde a un porcentaje positivo de 98.53 % que indica que las dos variables son altamente parecidas.

El valor de la pendiente ( $m$ ) y el de la intersección ( $b$ ) obtenido de la ecuación de la línea (Figura 48) deben ser los mismos obtenidos tanto por el método gráfico como por el matemático obtenido mediante las funciones hechas en la hoja de cálculo (Figura 49) comparando los mismo rangos, fecha inicial y fecha final.

ID		BISO																		
Servicio		CSRS - PPP																		
Volcán		VNR																		
Altura Antena (m)		5086													PENDIENTE E	1,1071	PENDIENTE N	1,1709	PENDIENTE U	0,5586
Procesamiento		<a href="http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php">http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php</a>													INTERSECCION E	-0,0115	INTERSECCION N	-0,0543	INTERSECCION U	0,0019
FECHA	DÍA JULIANO	DIFERENCIAS BISO			ERRORES			DIFERENCIAS SECR			ERRORES			BISO CORREGIDAS						
		D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)				
12/05/2017	132	0,000	0,000	0,000	0,019	0,005	0,023	0,010	0,041	-0,008	0,006	0,002	0,010	-0,023	-0,102	0,003				
13/05/2017	133	-0,009	-0,004	-0,007	0,006	0,002	0,011	0,006	0,039	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,027	-0,104	-0,004				
14/05/2017	134	-0,012	-0,004	-0,006	0,006	0,002	0,011	0,006	0,041	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,001				
15/05/2017	135	-0,009	-0,004	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,009	0,039	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,104	-0,007				
16/05/2017	136	-0,009	-0,005	-0,005	0,006	0,002	0,011	0,009	0,040	-0,008	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,002				
17/05/2017	137	-0,005	-0,006	-0,009	0,006	0,002	0,011	0,012	0,039	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,006				
18/05/2017	138	-0,011	-0,003	-0,016	0,006	0,003	0,011	0,009	0,039	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,032	-0,103	-0,012				
19/05/2017	139	-0,009	-0,003	-0,013	0,006	0,003	0,011	0,010	0,041	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,032	-0,105	-0,008				
20/05/2017	140	-0,009	-0,004	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,011	0,038	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,033	-0,103	-0,008				
21/05/2017	141	-0,008	-0,002	-0,010	0,006	0,002	0,011	0,010	0,039	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,031	-0,102	-0,005				
22/05/2017	142	-0,007	-0,004	-0,009	0,006	0,002	0,011	0,007	0,040	-0,013	0,006	0,002	0,010	-0,026	-0,105	-0,004				
23/05/2017	143	-0,010	-0,004	-0,014	0,006	0,002	0,011	0,011	0,040	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,034	-0,105	-0,010				
24/05/2017	144	-0,008	-0,001	-0,008	0,006	0,002	0,011	0,010	0,038	-0,008	0,006	0,002	0,011	-0,031	-0,100	-0,005				
25/05/2017	145	-0,008	-0,005	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,014	0,040	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,035	-0,106	-0,009				
26/05/2017	146	-0,009	-0,002	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,013	0,040	-0,011	0,006	0,002	0,010	-0,035	-0,103	-0,008				
27/05/2017	147	-0,003	-0,003	-0,010	0,006	0,002	0,011	0,011	0,042	-0,001	0,006	0,002	0,010	-0,027	-0,106	-0,011				

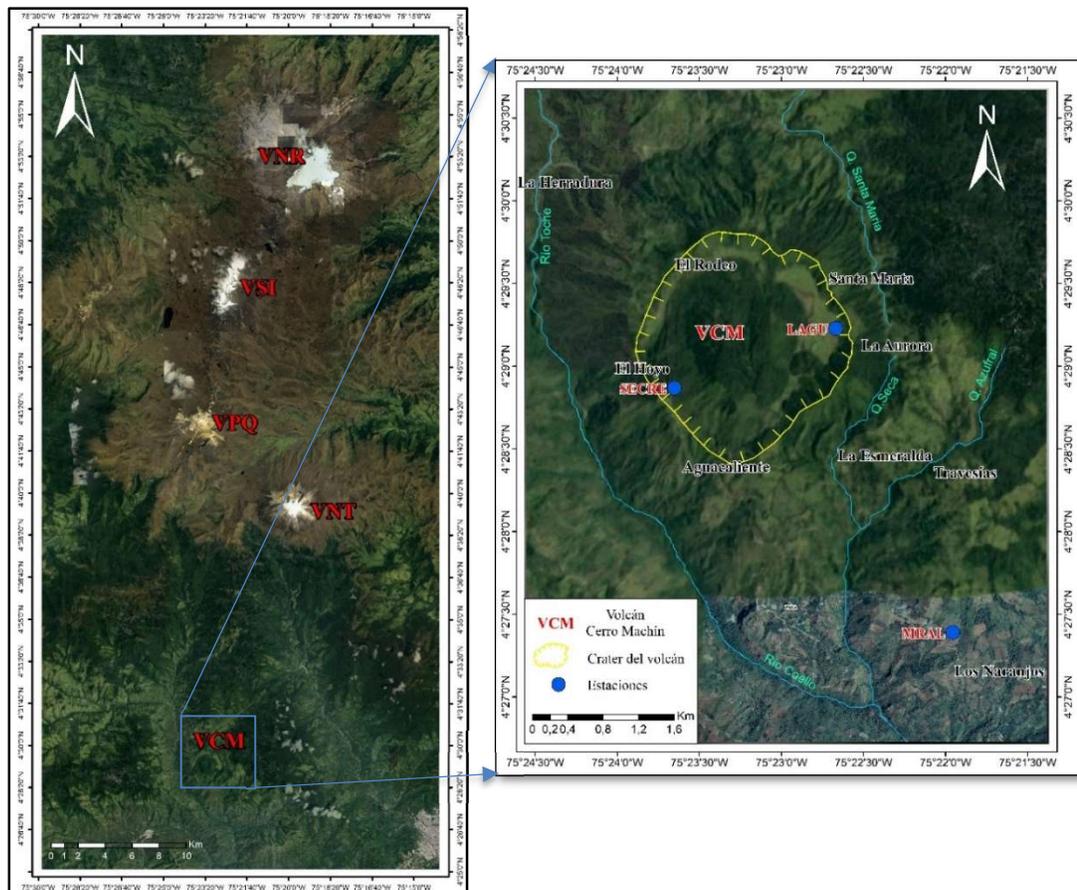
Figura 49. Pendiente e intersección obtenidos por medio de las funciones matemáticas en la hoja de cálculo para las estaciones GNSS BISO y SECR.

## 8.7 Corrección Tectónica de los Datos GNSS

Para remover el efecto tectónico de las estaciones GNSS del VNR se utilizan estaciones GNSS de referencia que no están afectadas por efectos volcánicos y que están localizadas en el mismo bloque tectónico, es decir, que están afectadas por los mismos movimientos tectónicos.

Para la corrección tectónica de los datos utilizados en este trabajo, se utilizan tres estaciones GNSS de referencia de la red de deformación del Volcán Cerro Machín (VCM): LAGU, MRAL y SECR. La ubicación del VCM y la ubicación de estas tres estaciones se muestran en la Figura 50. Estas estaciones GNSS se instalaron en el marco del proyecto “Operación y Mantenimiento de las Redes del Monitoreo Volcánico” y de la actividad “Investigación y Monitoreo de la Actividad Volcánica”. Este proyecto y esta actividad tienen como objetivo

la instalación de estaciones GNSS permanentes para la vigilancia y monitoreo de la deformación de la superficie del VCM, localizado en el departamento del Tolima. La estación LAGU fue instalada en enero de 2011 al NE del VCM en el sector conocido como La Laguna. La estación MRAL se instaló en mayo de 2011 al SE del VCM en el sector conocido como Moral. La estación SECR se instaló en julio de 2011 al SW del VCM en cercanías del sector conocido como La Secreta. Estas estaciones GNSS envían los datos al SGC - OVSM a través de una red de comunicaciones instaladas en el cerro de Cielo Roto ubicado al SE del municipio de Cajamarca, departamento de Tolima.



**Figura 50.** Ubicación geográfica del VCM y de las estaciones GNSS de referencia LAGU, MRAL, SECR. Imagen satelital tomada y modificada del satélite de Google Earth.

Los datos recopilados de las estaciones GNSS LAGU, MRAL y SECR se procesan para obtener las posiciones diarias de las componentes Norte, Este y Altura. Las posiciones que tienen una dispersión muy grande se remueven considerando la desviación estándar de toda la muestra de datos.

A las estaciones de referencia GNSS LAGU, MRAL, SECR se les aplica el método de sustracción directa a partir del primer dato de referencia de la muestra para obtener el valor “ $d_i$ ” correspondiente (capítulo 8.5). El “ $d_i$ ” es el valor que permite hacer la correlación y la sustracción del efecto tectónico (capítulo 8.6).

Luego de realizar la serie de tiempo y la correlación de las componentes Este, Norte y Altura, se obtiene la ecuación de la línea, la pendiente ( $m$ ) y la intersección ( $b$ ) para cada estación GNSS, ya sea usando orbitas ultra-rápidas, rápidas o finales. La siguiente fórmula permite hacer la corrección de la variable independiente:

$$dc = d_{ir} \pm (b) - (m) * d_{im}$$

Donde:

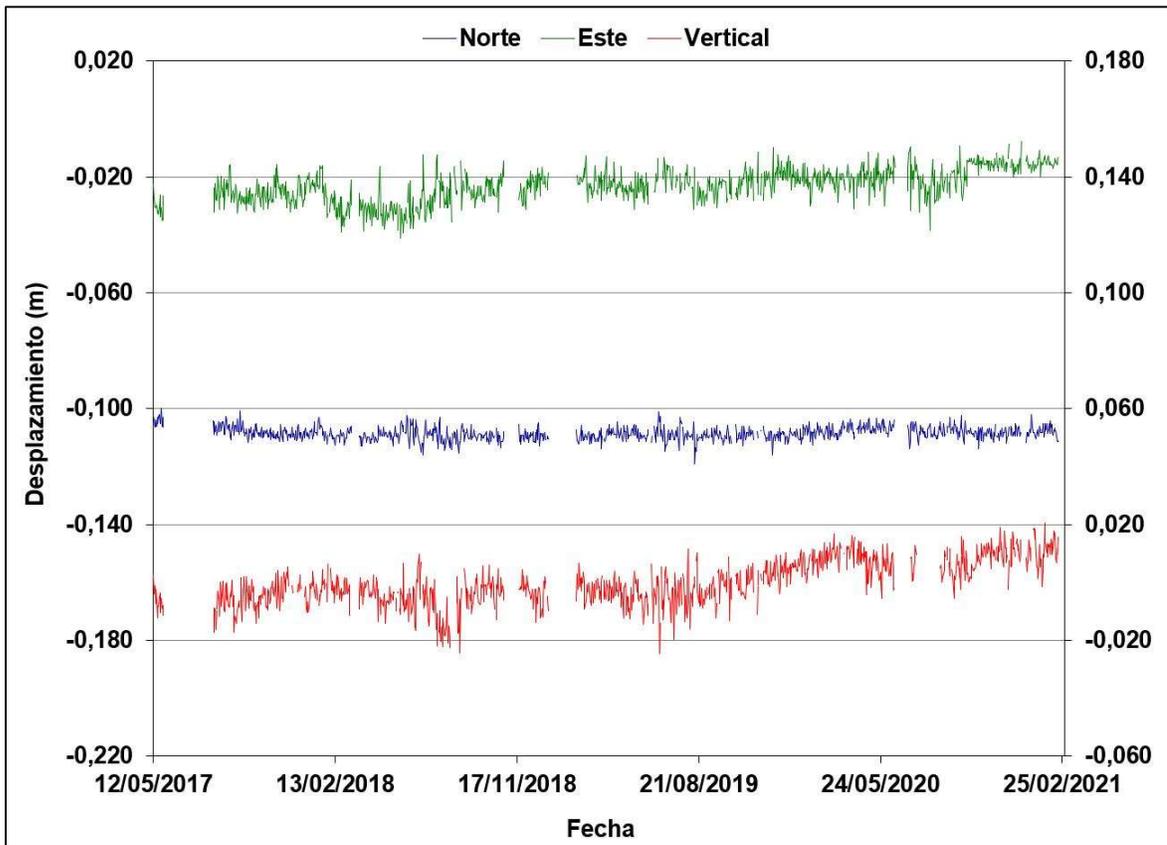
- $dc$  es el dato corregido.
- $d_{ir}$  es el valor de la diferencia “ $d_i$ ” calculada para la estación a corregir o variable dependiente.
- El signo siguiente es  $\pm$  dependiendo del signo de la intersección “ $b$ ”. Si “ $b$ ” es de signo negativo, la fórmula tendrá signo positivo y viceversa.
- $b$  es el valor de la intersección del eje Y, calculado a partir de la variable independiente para cada estación GNSS del VNR a corregir y de las estaciones GNSS del VCM que se usan de referencia para la corrección.
- $m$  es la pendiente de la recta calculada para cada estación GNSS del VNR a corregir y de las estaciones GNSS del VCM que se usa para la corrección.
- $d_{im}$  es el valor de la diferencia “ $d_i$ ” calculado para la estación de referencia con la que se hace la corrección o variable independiente.

Por medio de esta fórmula se obtienen los datos corregidos (*dc*) de cada día para cada estación GNSS del VNR. Estos datos corregidos son utilizados para realizar las series de tiempo volcánicas a las cuales se les ha quitado el efecto tectónico tanto para las orbitas ultra-rápidas, rápidas y finales. Todas las correcciones se realizan en una hoja de cálculo Excel (Figura 51).

FECHA		DIFERENCIAS BISO			ERRORES			DIFERENCIAS SECR			ERRORES			BISO CORREGIDAS SECR		
DÍA JULIANO	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)	SE (m)	SN (m)	SU (m)	D_E (m)	D_N (m)	D_U (m)	
12/05/2017	132	0,000	0,000	0,000	0,019	0,005	0,023	0,010	0,041	-0,008	0,006	0,002	0,010	SMS3*19	-0,102	0,003
13/05/2017	133	-0,009	-0,004	-0,007	0,006	0,002	0,011	0,006	0,039	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,027	-0,104	-0,004
14/05/2017	134	-0,012	-0,004	-0,006	0,006	0,002	0,011	0,006	0,041	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,001
15/05/2017	135	-0,009	-0,004	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,009	0,039	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,104	-0,007
16/05/2017	136	-0,009	-0,005	-0,005	0,006	0,002	0,011	0,009	0,040	-0,008	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,002
17/05/2017	137	-0,005	-0,006	-0,009	0,006	0,002	0,011	0,012	0,039	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,030	-0,106	-0,006
18/05/2017	138	-0,011	-0,003	-0,016	0,006	0,003	0,011	0,009	0,039	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,032	-0,103	-0,012
19/05/2017	139	-0,009	-0,003	-0,013	0,006	0,003	0,011	0,010	0,041	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,032	-0,105	-0,008
20/05/2017	140	-0,009	-0,004	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,011	0,038	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,033	-0,103	-0,008
21/05/2017	141	-0,008	-0,002	-0,010	0,006	0,002	0,011	0,010	0,039	-0,012	0,006	0,002	0,010	-0,031	-0,102	-0,005
22/05/2017	142	-0,007	-0,004	-0,009	0,006	0,002	0,011	0,007	0,040	-0,013	0,006	0,002	0,010	-0,026	-0,105	-0,004
23/05/2017	143	-0,010	-0,004	-0,014	0,006	0,002	0,011	0,011	0,040	-0,010	0,006	0,002	0,010	-0,034	-0,105	-0,010
24/05/2017	144	-0,008	-0,001	-0,008	0,006	0,002	0,011	0,010	0,038	-0,008	0,006	0,002	0,011	-0,031	-0,100	-0,005
25/05/2017	145	-0,008	-0,005	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,014	0,040	-0,009	0,006	0,002	0,010	-0,035	-0,106	-0,009
26/05/2017	146	-0,009	-0,002	-0,012	0,006	0,002	0,011	0,013	0,040	-0,011	0,006	0,002	0,010	-0,035	-0,103	-0,008
27/05/2017	147	-0,003	-0,003	-0,010	0,006	0,002	0,011	0,011	0,042	-0,001	0,006	0,002	0,010	-0,027	-0,106	-0,011

Figura 51. Formato usado en la hoja de cálculo para la obtención de los datos corregidos del efecto tectónico para la estación GNSS BISO. El recuadro de color rojo muestra la fórmula utilizada.

Las series de tiempo realizadas con los datos corregidos (*dc*) permiten obtener un gráfico de tipo línea en donde se relaciona en el eje X la variable tiempo y en el eje Y los “*dc*” para las componentes Norte, Este y Altura (Figura 52).



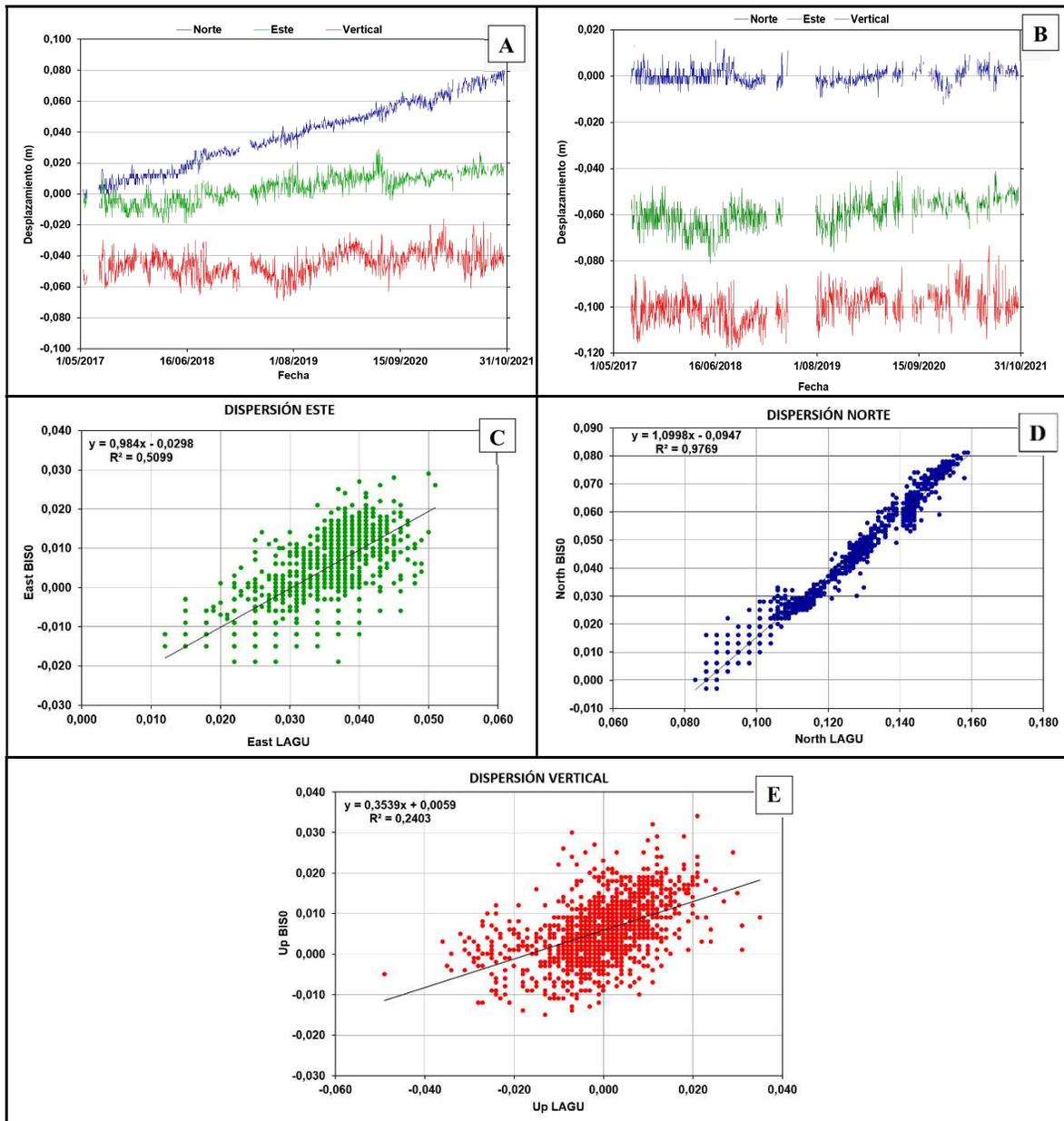
**Figura 52.** Serie de tiempo de la estación GNSS BIS0 para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento mediante orbitas finales, utilizando la estación GNSS de referencia SECR de la red de deformación del VCM.

## 9. Resultados

### 9.1 Análisis de Series de Tiempo Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas

#### 9.1.1 Estación BIS0 con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas

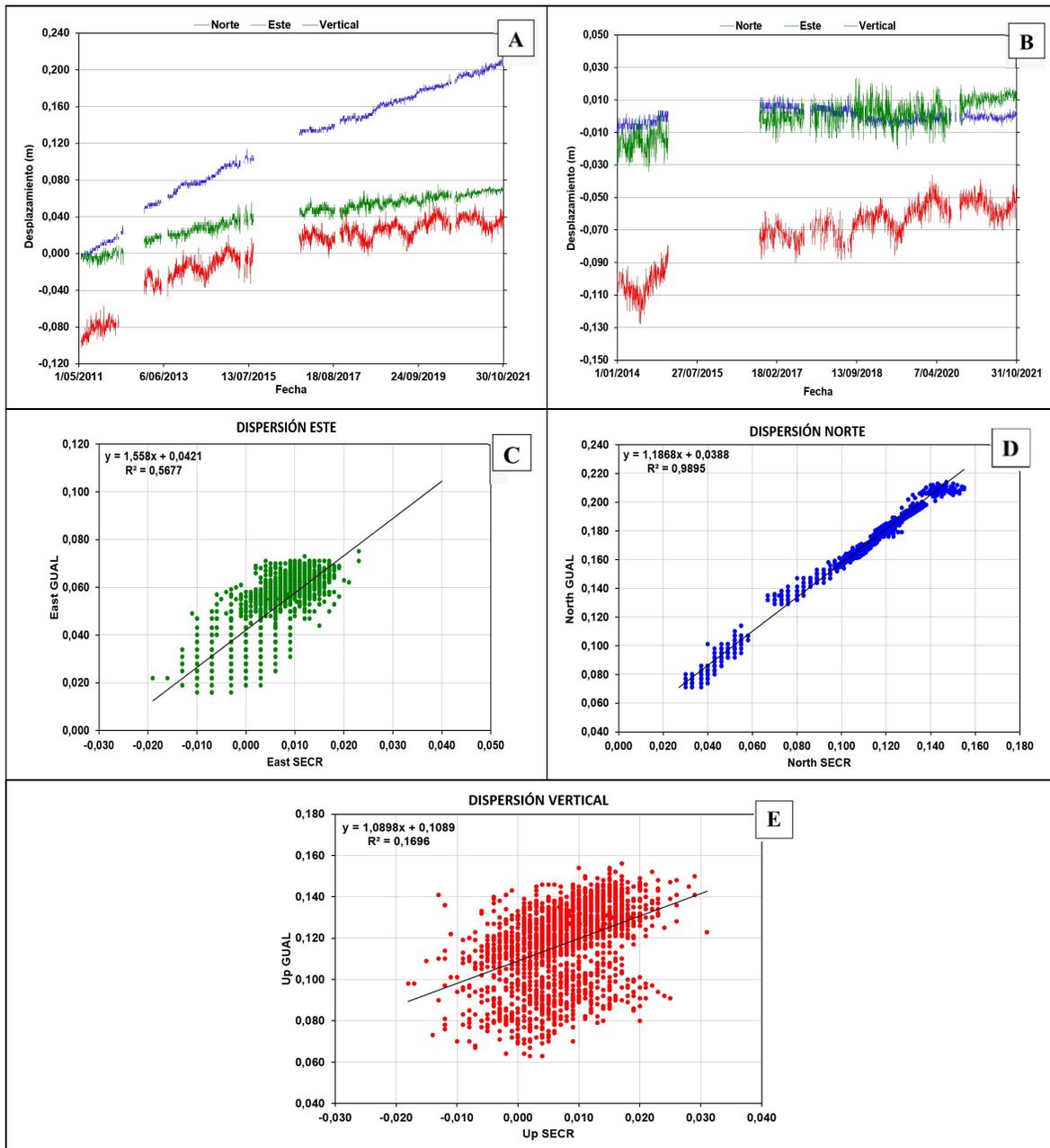
La estación GNSS BIS0 está localizada a 1,9 km al W del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 2, 15 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 53A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia LAGU de 50,99 %, 97,69 % y 24,03 % para las componentes Este (Figura 53C), Norte (Figura 53D) y Altura (Figura 53E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico (Figura 53B), el cual evidencia estabilidad para el periodo comprendido entre el 1 de mayo de 2017 y el 31 de octubre de 2021, es decir el VNR no registró deformación volcánica para este periodo. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación BIS0 y LAGU es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 50 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones BIS0 y LAGU es diferente.



**Figura 53.** A: serie de tiempo de la estación GNSS BIS0 para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas ultra-rápidas y rápidas mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS BIS0 con la corrección a partir de la estación de referencia LAGU, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación BIS0 y la estación de referencia LAGU. D: correlación para la componente Norte entre la estación BIS0 y la estación de referencia LAGU. E: correlación para la componente Altura entre la estación BIS0 y la estación de referencia LAGU.

### 9.1.2 Estación GUAL con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas

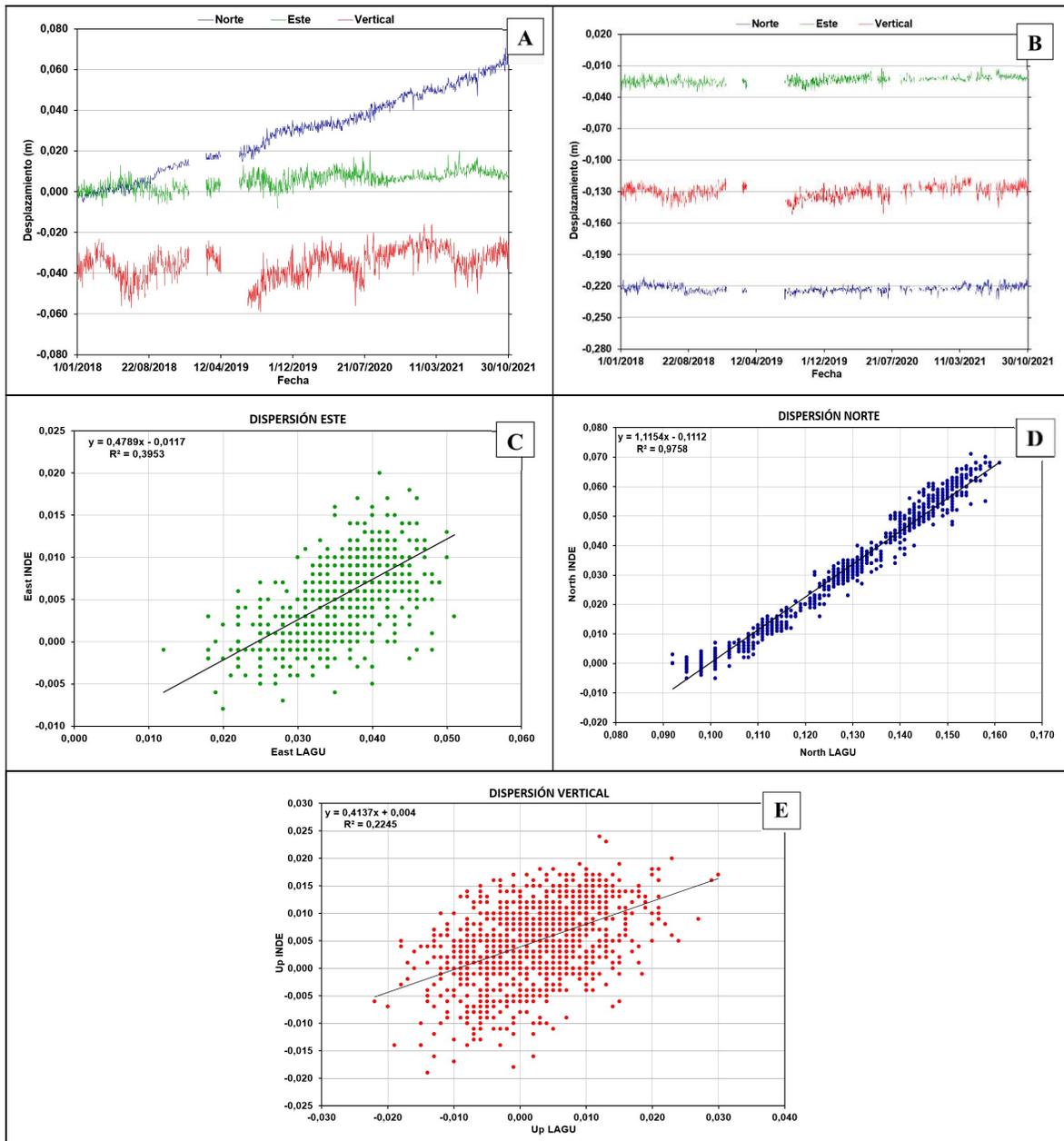
La estación GNSS GUAL está localizada a 1,9 km al NW del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 5, 15 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 54A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia SECR de 56,77 %, 98,95 % y 16,96 % para las componentes Este (Figura 54C), Norte (Figura 54D) y Altura (Figura 54E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación GNSS de referencia MRAL (Figura 54B), el cual evidencia estabilidad general en la componente Norte para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2014 y 31 de octubre de 2021, con un periodo de inestabilidad desde octubre del 2014 hasta octubre del 2016, momento en el cual se estabilizó y es seguido por un proceso deformativo negativo a partir de esta fecha hasta enero de 2019, momento en el cual se estabilizó. Para la componente Este se observa el mismo proceso deformativo positivo desde octubre del 2014 hasta octubre del 2016, seguido por un periodo de estabilidad y a partir de agosto de 2020 se observa nuevamente una estabilidad positiva hasta febrero de 2021, momento en el cual se estabilizó. Para la componente vertical se observa de forma sostenida un proceso inflacionario desde finales de 2014 hasta finales de 2019, momento en el cual se estabilizó. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación GUAL y SECR es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 60 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones GUAL y SECR es diferente.



**Figura 54.** A: serie de tiempo de la estación GNSS GUAL para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas ultra-rápidas y rápidas mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS GUAL con la corrección a partir de la estación de referencia MRAL, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación GUAL y la estación de referencia SECR. D: correlación para la componente Norte entre la estación GUAL y la estación de referencia SECR. E: correlación para la componente Altura entre la estación GUAL y la estación de referencia SECR.

### 9.1.3 Estación INDE con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas

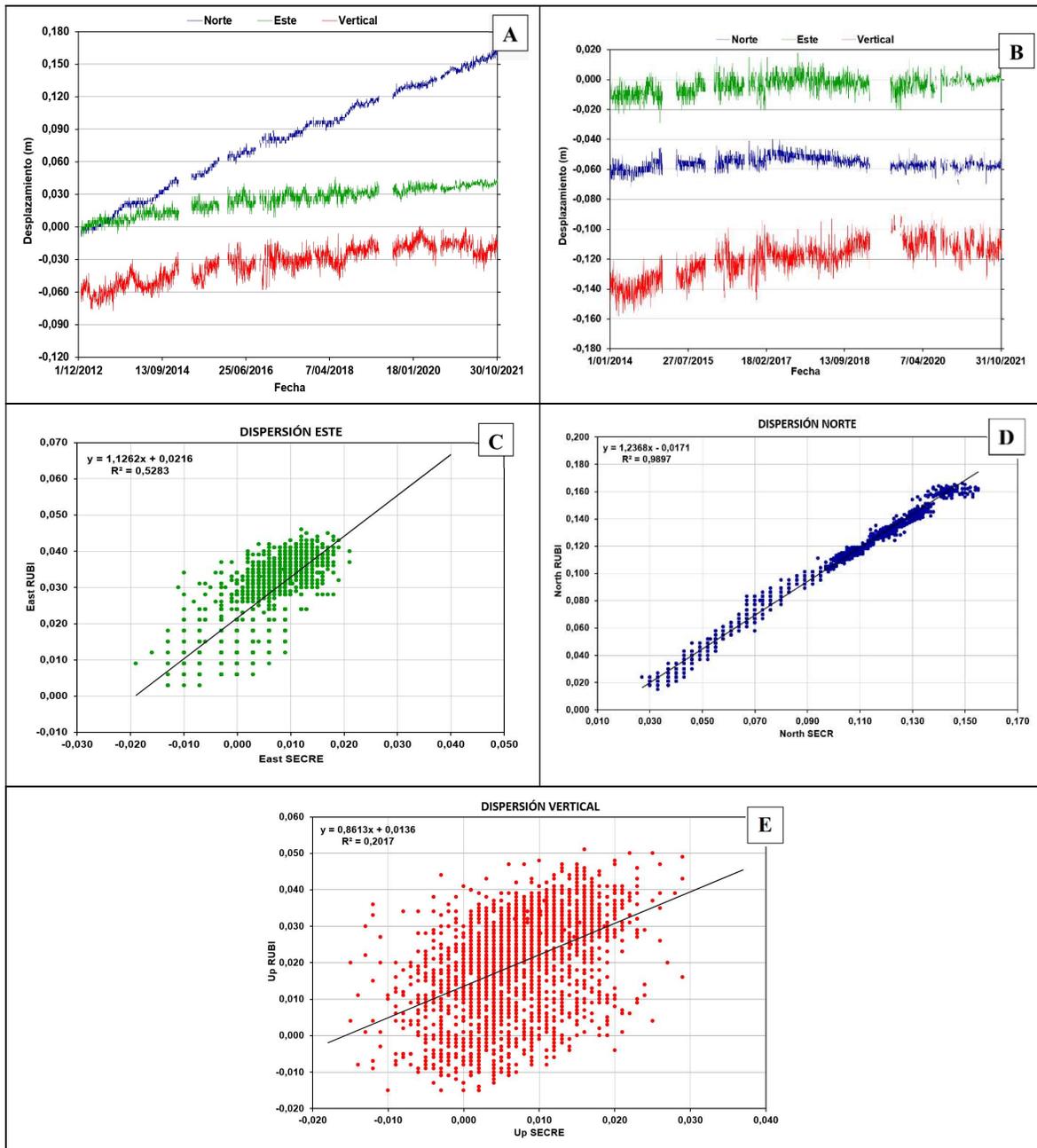
La estación GNSS INDE está localizada a 5,3 km al NW del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 2, 16 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 55A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia LAGU de 39,53 %, 97,58 % y 22,45 % para las componentes Este (Figura 55C), Norte (Figura 55D) y Altura (Figura 55E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico (Figura 55B), el cual evidencia estabilidad para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2018 y el 31 de octubre de 2021, es decir el VNR no registró deformación volcánica para este periodo. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación INDE y LAGU es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es menor al 40 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones INDE y LAGU es diferente.



**Figura 55.** A: serie de tiempo de la estación GNSS INDE para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas ultra-rápidas y rápidas mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS INDE con la corrección a partir de la estación de referencia LAGU, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación INDE y la estación de referencia LAGU. D: correlación para la componente Norte entre la estación INDE y la estación de referencia LAGU. E: correlación para la componente Altura entre la estación INDE y la estación de referencia LAGU.

#### 9.1.4 Estación RUBI con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas

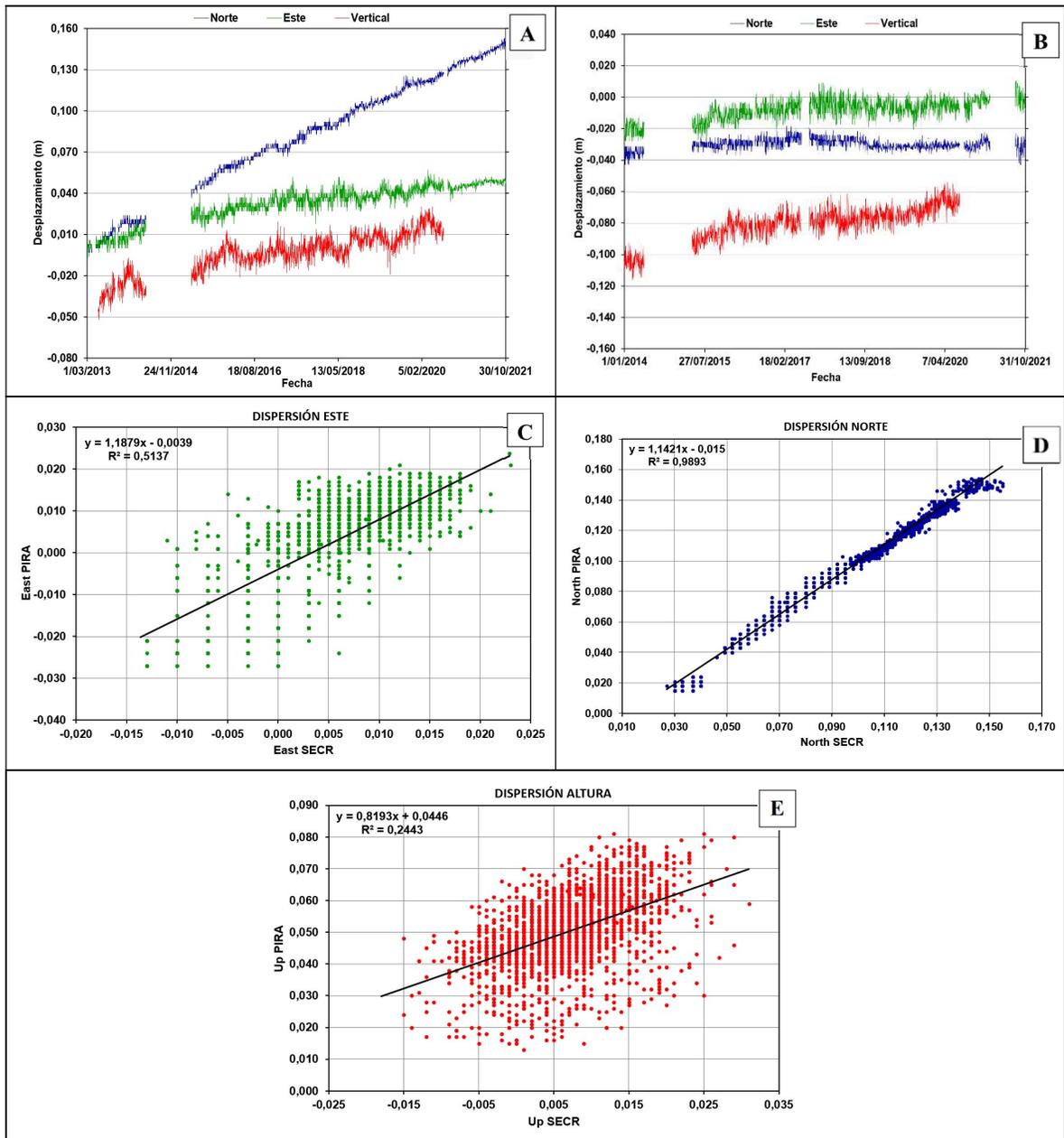
La estación GNSS RUBI está localizada a 4 km al NE del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 5, 14 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 56A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia SECR de 52,83 %, 98,97 % y 20,17 % para las componentes Este (Figura 56C), Norte (Figura 56D) y Altura (Figura 56E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación GNSS de referencia LAGU (Figura 56B), el cual evidencia para la componente Este y Norte un proceso deformativo positivo de 10 mm desde agosto del 2014 hasta julio de 2017. Para el mismo periodo en la componente vertical se observa un aumento de 22 mm. A partir de agosto de 2019 se observa estabilidad en las tres componentes. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación RUBI y SECR es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 50 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones RUBI y SECR es diferente.



**Figura 56.** A: serie de tiempo de la estación GNSS RUBI para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas ultra-rápidas y rápidas mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS RUBI con la corrección a partir de la estación de referencia LAGU, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación RUBI y la estación de referencia SECR. D: correlación para la componente Norte entre la estación RUBI y la estación de referencia SECR. E: correlación para la componente Altura entre la estación RUBI y la estación de referencia SECR.

### 9.1.5 Estación PIRA con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas

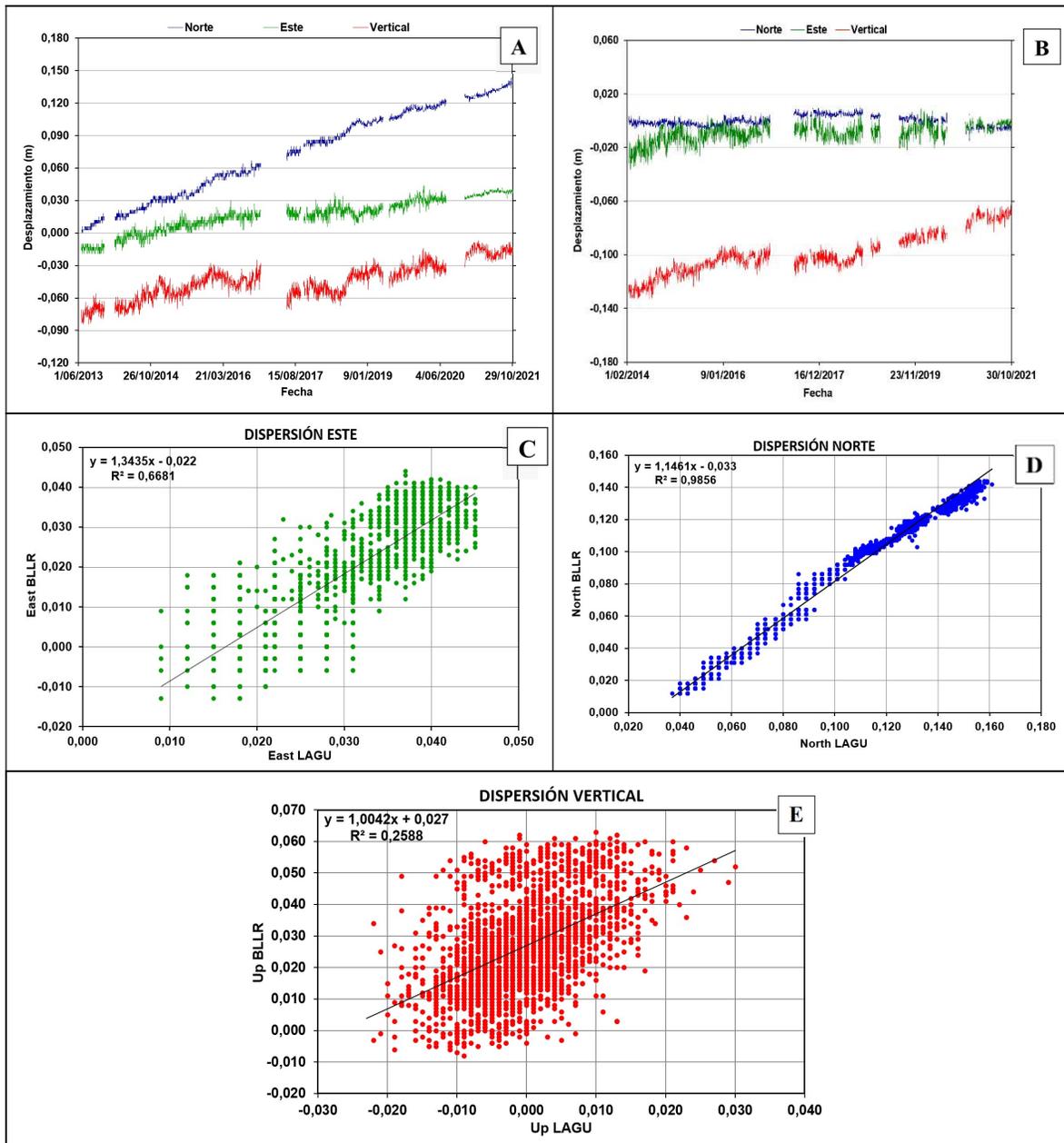
La estación GNSS PIRA está localizada a 4,15 km al NE del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 6, 16 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 57A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia SECR de 51,37 %, 98,93 % y 24,43 % para las componentes Este (Figura 57C), Norte (Figura 57D) y Altura (Figura 57E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico (Figura 57B), en el cual se evidencia para las componentes Este y Norte un proceso deformativo inflacionario de 12 mm desde mediados desde el 2014 hasta abril de 2017, sin tener claro el inicio del evento debido a la ausencia de registro previo de datos. En abril de 2017 se estabilizó. Para la componente vertical se observa el mismo evento deformativo iniciando a mediados de 2014 de 29 mm y estabilizándose en febrero del 2017. Posteriormente, para agosto de 2019 se observa otro evento deformativo positivo de 13 mm en esta componente que se estabilizó en abril de 2020. A partir de enero de 2020 se observa nuevamente un evento deformativo positivo en las componentes Este y Norte de 7 mm que se estabilizó en octubre de 2021. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación PIRA y SECR es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 50 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones PIRA y SECR es diferente.



**Figura 57.** A: serie de tiempo de la estación GNSS PIRA para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas ultra-rápidas y rápidas mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS PIRA con la corrección a partir de la estación de referencia SECR, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación PIRA y la estación de referencia SECR. D: correlación para la componente Norte entre la estación PIRA y la estación de referencia SECR. E: correlación para la componente Altura entre la estación PIRA y la estación de referencia SECR.

### 9.1.6 Estación BLLR con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas

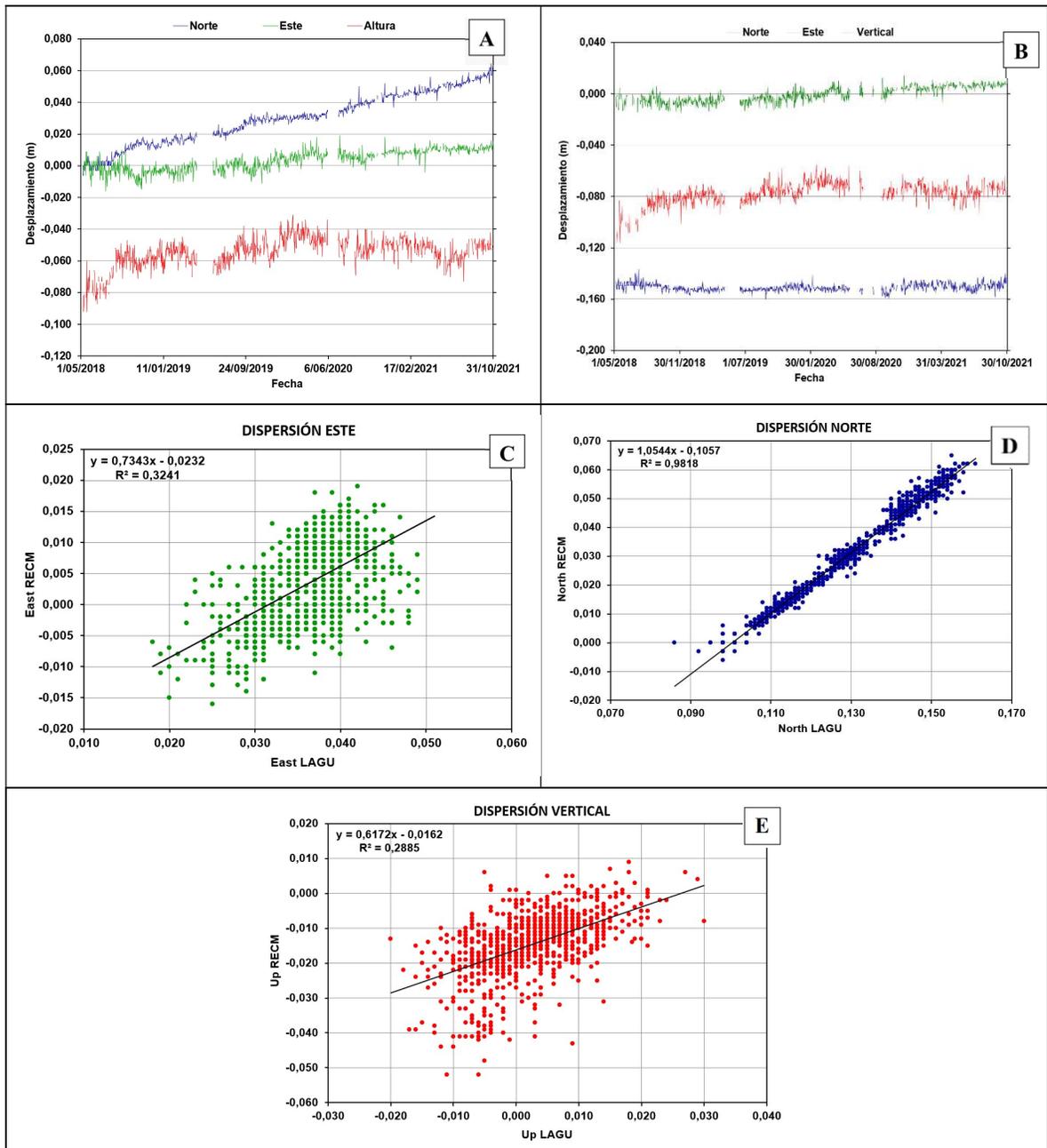
La estación GNSS BLLR está localizada a 10,46 km al SE del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 9, 16 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 58A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia LAGU de 66,81 %, 98,56 % y 22,58 % para las componentes Este (Figura 58C), Norte (Figura 58D) y Altura (Figura 58E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico (Figura 58B), el cual evidencia un proceso deformativo positivo de 13 mm en la componente Este desde julio de 2015 hasta diciembre de 2017, momento en el cual se estabilizó. A partir de septiembre de 2019 se observa otro evento deformativo positivo de 14 mm que se mantuvo hasta octubre de 2021. Para la componente Norte se observa un evento deformativo positivo de 10 mm desde diciembre de 2016 hasta julio de 2017. A partir de noviembre de 2018 se identifica un evento deformativo negativo de 9 mm que se estabiliza en septiembre de 2019 y luego nuevamente otro evento deformativo negativo de 5 mm desde julio de 2020 hasta diciembre de 2020. Para la componente vertical hay un evento inflacionario de 30 mm desde febrero de 2014 hasta marzo de 2016. Luego ocurre otro evento inflacionario de 12 mm desde agosto de 2018 hasta febrero de 2019. Finalmente, para febrero de 2021 existe otro evento deformativo positivo de 15 mm hasta abril de 2021, momento en el cual se estabilizó. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación BLLR y LAGU es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 70 % ya que esta componente presenta una moderada velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones BLLR y LAGU es diferente.



**Figura 58.** A: serie de tiempo de la estación GNSS BLLR para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas ultra-rápidas y rápidas mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS BLLR con la corrección a partir de la estación de referencia LAGU, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación BLLR y la estación de referencia LAGU. D: correlación para la componente Norte entre la estación BLLR y la estación de referencia LAGU. E: correlación para la componente Altura entre la estación BLLR y la estación de referencia LAGU.

### 9.1.7 Estación RECM con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas

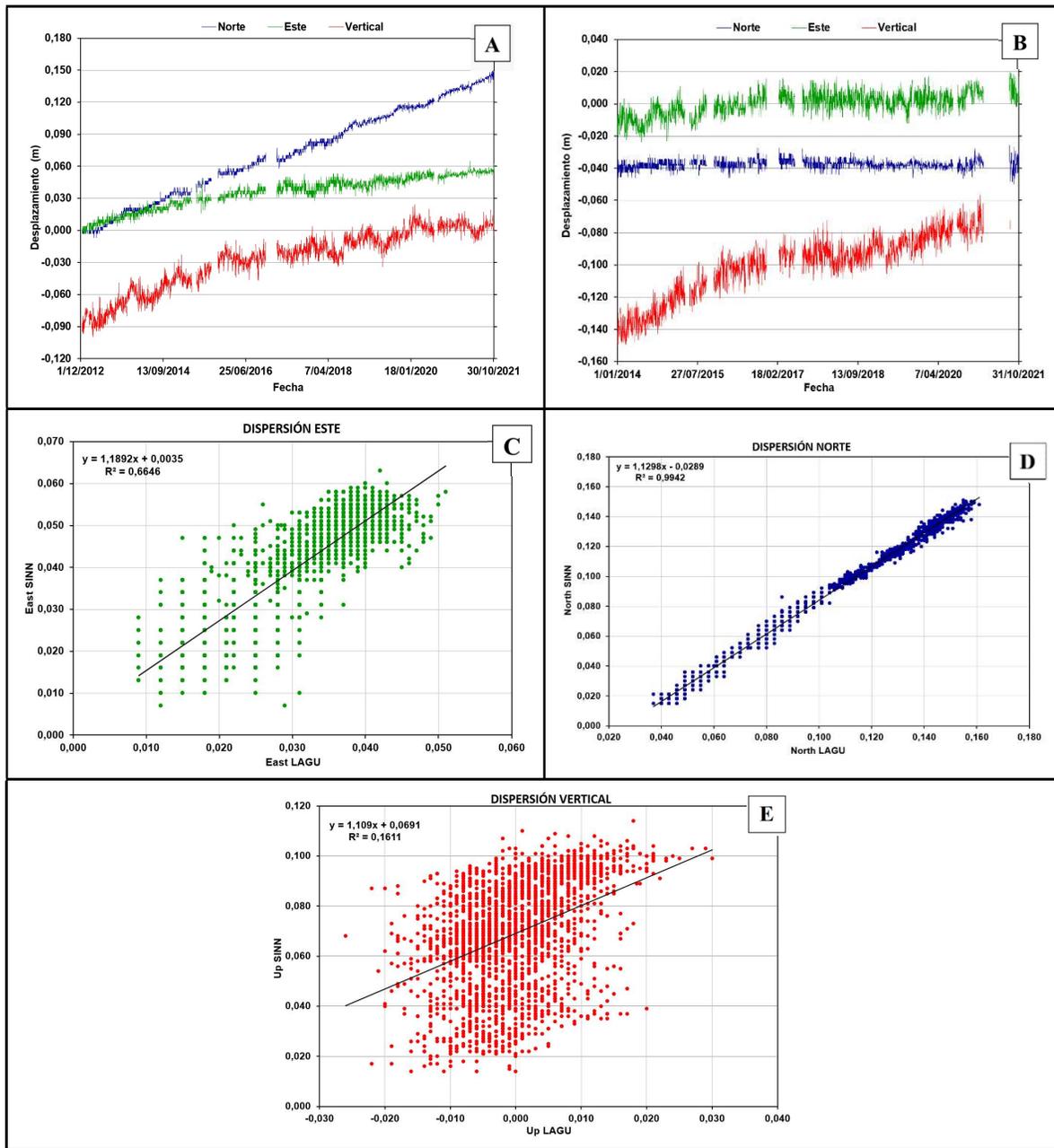
La estación GNSS RECM está localizada a 3,83 km al SW del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 6, 14 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 59A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia LAGU de 32,41 %, 98,18 % y 28,85 % para las componentes Este (Figura 59C), Norte (Figura 59D) y Altura (Figura 59E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación GNSS de referencia MRAL (Figura 59B), el cual evidencia estabilidad para la componente Norte. En la componente Este se observa un proceso deformativo positivo de 9 mm desde octubre de 2019 hasta febrero de 2021. Para la componente vertical se observa un evento deformativo positivo de 33 mm desde julio de 2018 hasta febrero de 2020. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación RECM y LAGU es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es menor al 30 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones RECM y LAGU es diferente.



**Figura 59.** A: serie de tiempo de la estación GNSS RECM para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas ultra-rápidas y rápidas mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS RECM con la corrección a partir de la estación de referencia MRAL, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación RECM y la estación de referencia LAGU. D: correlación para la componente Norte entre la estación RECM y la estación de referencia LAGU. E: correlación para la componente Altura entre la estación RECM y la estación de referencia LAGU.

### 9.1.8 Estación SINN con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas

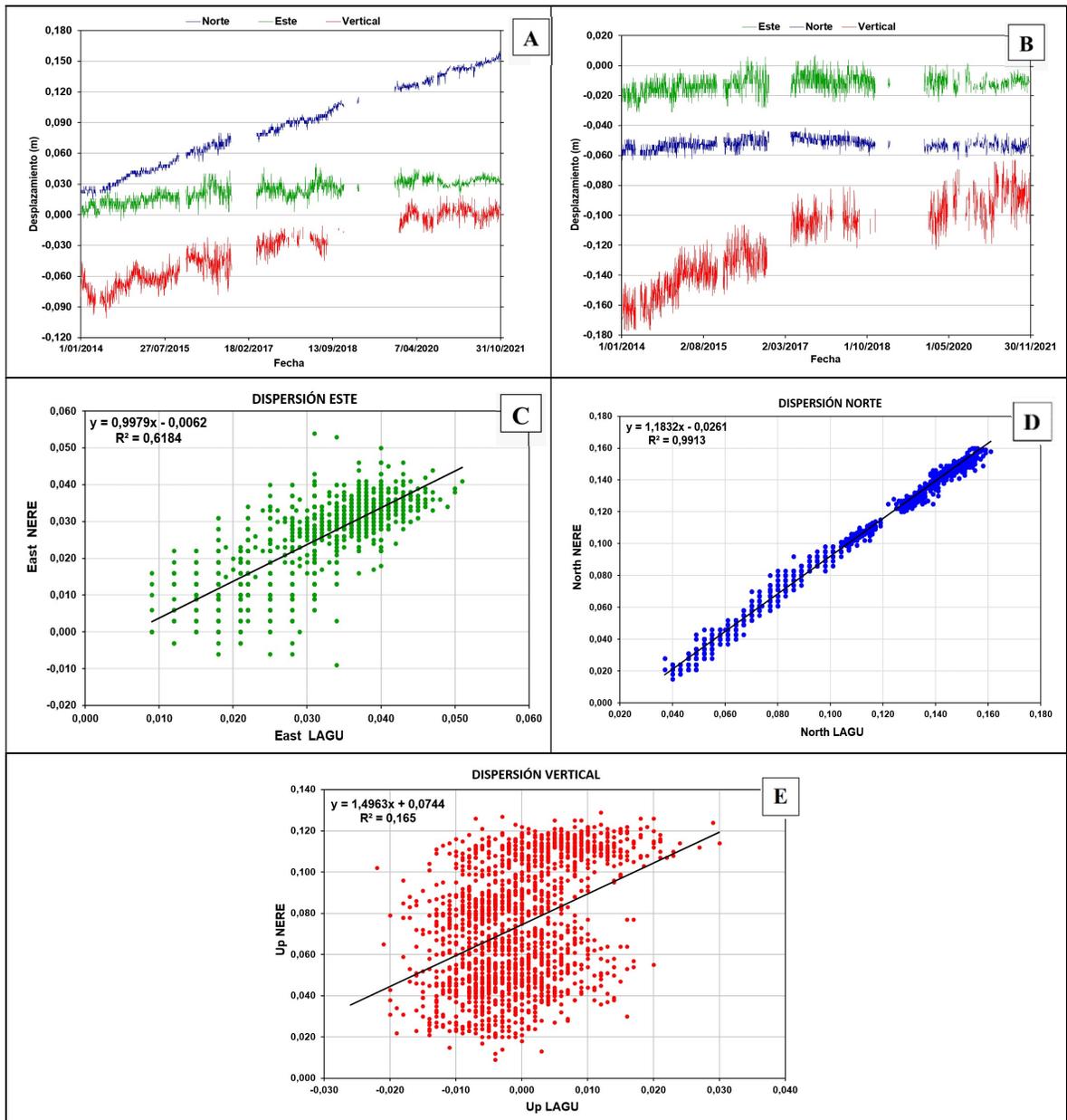
La estación GNSS SINN está localizada a 3,83 km al SW del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 5, 11 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 60A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia LAGU de 66,46 %, 99,42 % y 16,11 % para las componentes Este (Figura 60C), Norte (Figura 60D) y Altura (Figura 60E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación GNSS de referencia SECR (Figura 60B), el cual evidencia estabilidad para la componente Norte. En la componente Este se evidencia un proceso deformativo positivo de 13 mm desde agosto de 2014 hasta noviembre de 2016 y otro evento deformativo positivo de 8 mm desde septiembre 2020 hasta agosto de 2021. Para la componente vertical se observa un proceso deformativo positivo de 38 mm desde febrero de 2014 hasta abril de 2017 y otro proceso deformativo positivo de 22 mm desde julio de 2018 hasta febrero de 2021. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación SINN y LAGU es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercana al 70 % ya que esta componente presenta una moderada velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones SINN y LAGU es diferente.



**Figura 60.** A: serie de tiempo de la estación GNSS SINN para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas ultra-rápidas y rápidas mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS SINN con la corrección a partir de la estación de referencia SECR, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación SINN y la estación de referencia LAGU. D: correlación para la componente Norte entre la estación SINN y la estación de referencia LAGU. E: correlación para la componente Altura entre la estación SINN y la estación de referencia LAGU.

### 9.1.9 Estación NERE con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas

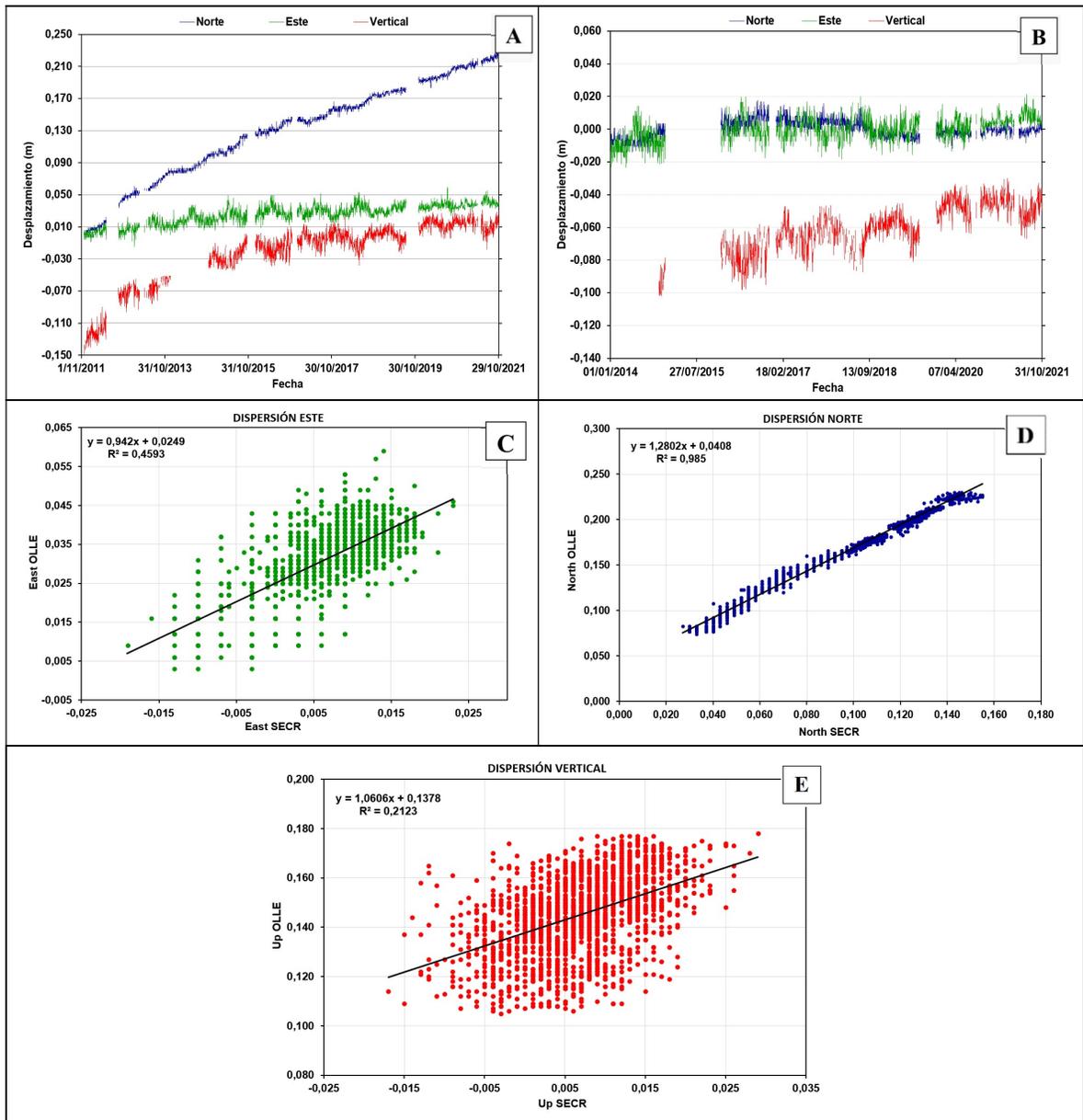
La estación GNSS NERE está localizada a 3,98 km al SW del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 5, 16 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 61A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia LAGU de 61,84 %, 99,13 % y 16,50 % para las componentes Este (Figura 61C), Norte (Figura 61D) y Altura (Figura 61E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico (Figura 61B), en el cual se evidencia estabilidad en la componente Norte desde el 1 de enero de 2014 hasta el 31 de octubre de 2021. Para la componente Este se observa un evento deformativo positivo desde abril de 2014 hasta julio de 2014 de 5 mm. Para la componente vertical se identifica un evento deformativo positivo de 41 mm desde abril de 2014 hasta abril de 2017. Otro evento deformativo positivo de 18 mm ocurre desde marzo de 2020 hasta marzo de 2021. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación NERE y LAGU es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercana al 60 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones NERE y LAGU es diferente.



**Figura 61.** A: serie de tiempo de la estación GNSS NERE para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas ultra-rápidas y rápidas mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS NERE con la corrección a partir de la estación de referencia LAGU, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación NERE y la estación de referencia LAGU. D: correlación para la componente Norte entre la estación NERE y la estación de referencia LAGU. E: correlación para la componente Altura entre la estación NERE y la estación de referencia LAGU.

### **9.1.10 Estación OLLE con Procesamiento Orbitas Ultra-rápidas y Rápidas**

La estación GNSS OLLE está localizada a 4,1 km al W del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 5, 16 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 62A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia SECR de 45,93 %, 98,50 % y 21,23 % para las componentes Este (Figura 62C), Norte (Figura 62D) y Altura (Figura 62E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación GNSS de referencia MRAL (Figura 62B), el cual evidencia un proceso deformativo positivo de 12 mm para la componente Norte desde junio de 2014 hasta julio de 2016. Entre julio de 2018 y febrero de 2019 se observa otro evento deformativo negativo de 9 mm. Para la componente Este se observa un evento deformativo positivo de 11 mm desde septiembre de 2020 hasta agosto de 2021. En la componente vertical se observa un evento deformativo positivo continuo de 52 mm desde noviembre de 2014 hasta marzo de 2020. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación OLLE y SECR es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 50 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones OLLE y SECR es diferente.

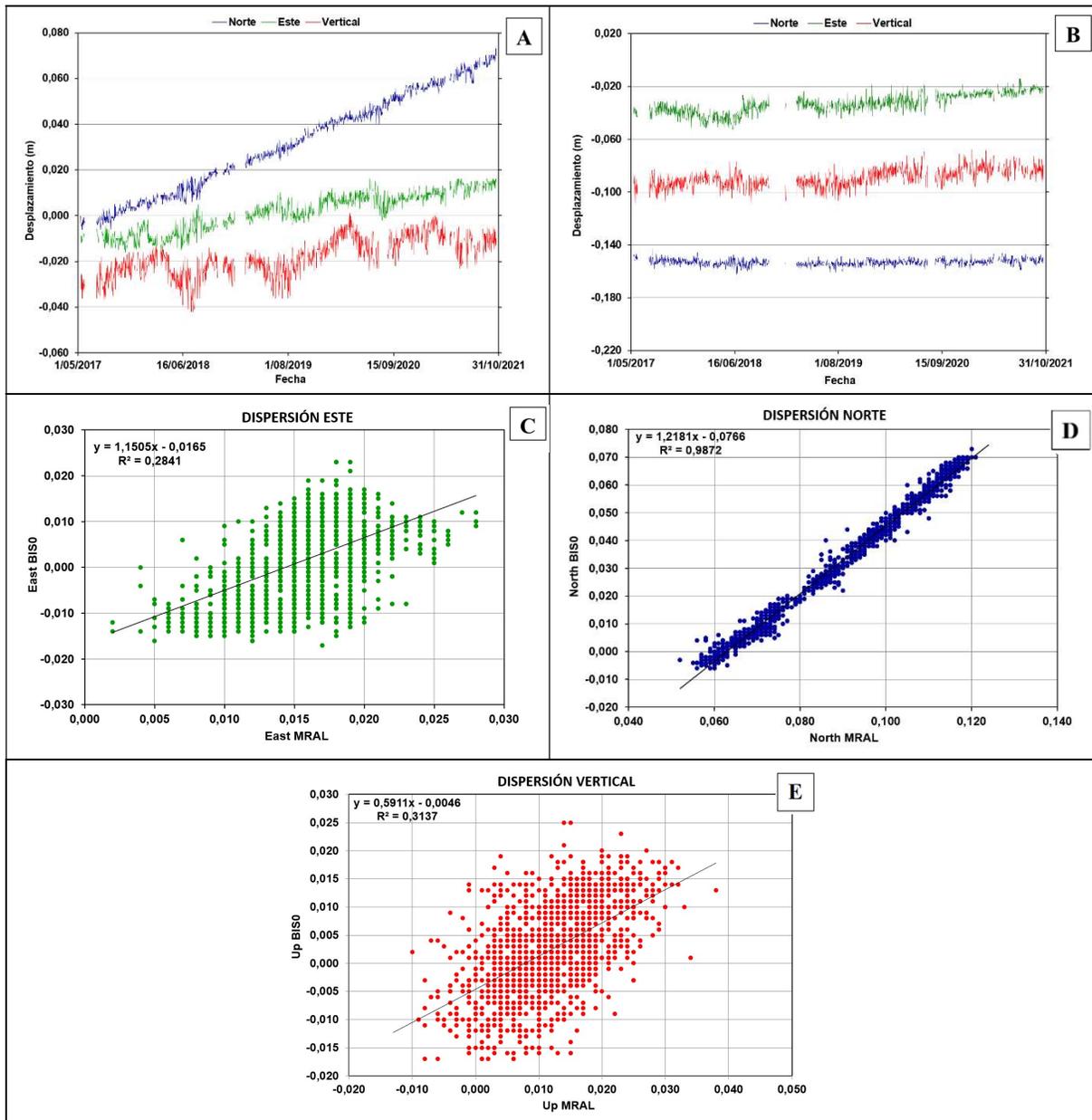


**Figura 62.** A: serie de tiempo de la estación GNSS OLLE para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas ultra-rápidas y rápidas mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS OLLE con la corrección a partir de la estación de referencia MRAL, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación OLLE y la estación de referencia SECR. D: correlación para la componente Norte entre la estación OLLE y la estación de referencia SECR. E: correlación para la componente Altura entre la estación OLLE y la estación de referencia SECR.

## 9.2 Análisis de Series de Tiempo Orbitas Finales

### 9.2.1 Estación BIS0 con Procesamiento Orbitas Finales

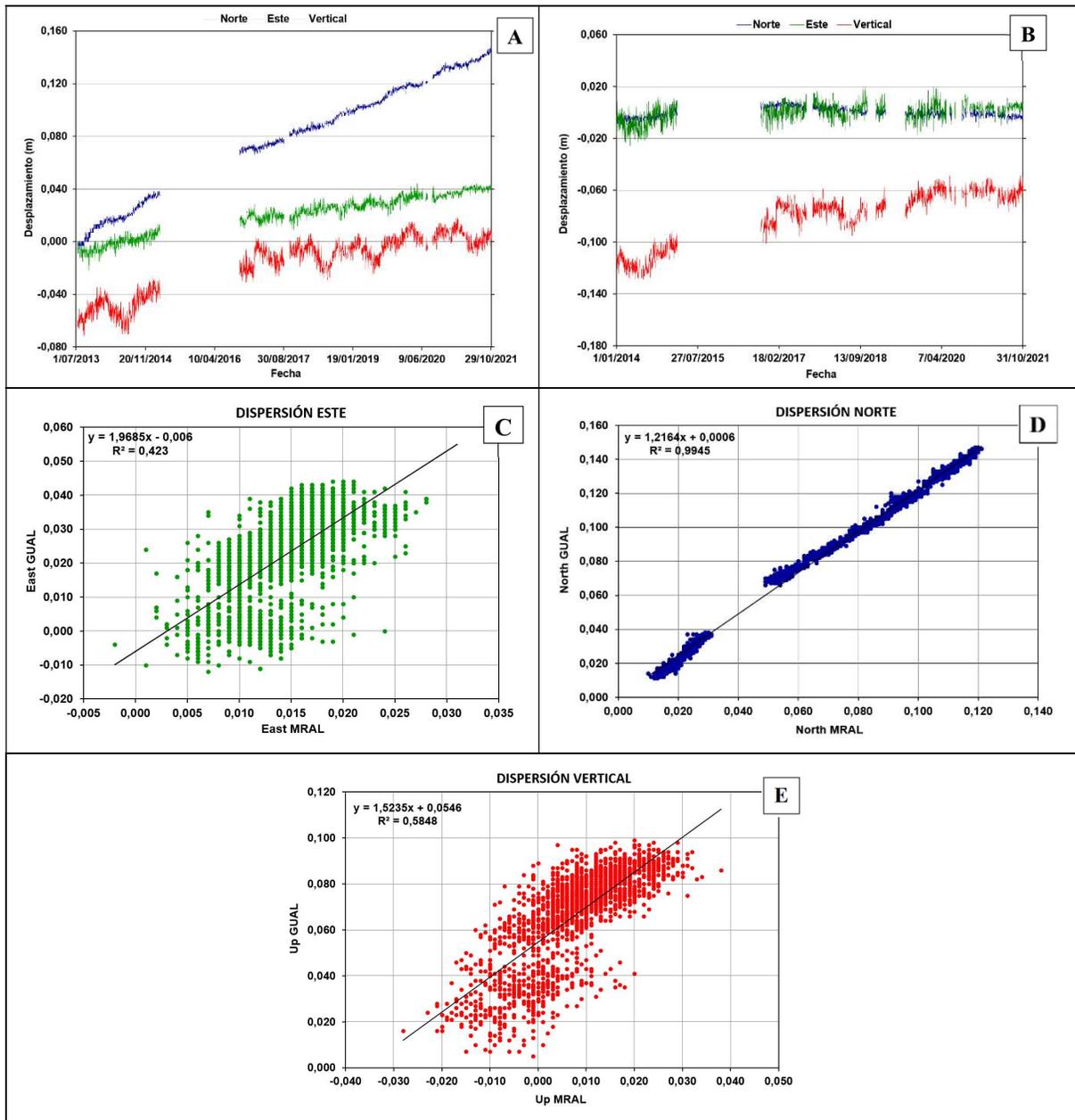
La estación GNSS BIS0 está localizada a 1,9 km al W del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 5, 12 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 63A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia MRAL de 28,41 %, 98,72 % y 31,37 % para las componentes Este (Figura 63C), Norte (Figura 63D) y Altura (Figura 63E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico (Figura 63B), el cual evidencia estabilidad para el periodo comprendido entre el 1 de mayo de 2017 y el 31 de octubre de 2021. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación BIS0 y MRAL es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es menor al 30 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones BIS0 y MRAL es diferente.



**Figura 63.** A: serie de tiempo de la estación GNSS BIS0 para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas finales mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS BIS0 con la corrección a partir de la estación de referencia MRAL, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación BIS0 y la estación de referencia MRAL. D: correlación para la componente Norte entre la estación BIS0 y la estación de referencia MRAL. E: correlación para la componente Altura entre la estación BIS0 y la estación de referencia MRAL.

### 9.2.2 Estación GUAL con Procesamiento Orbitas Finales

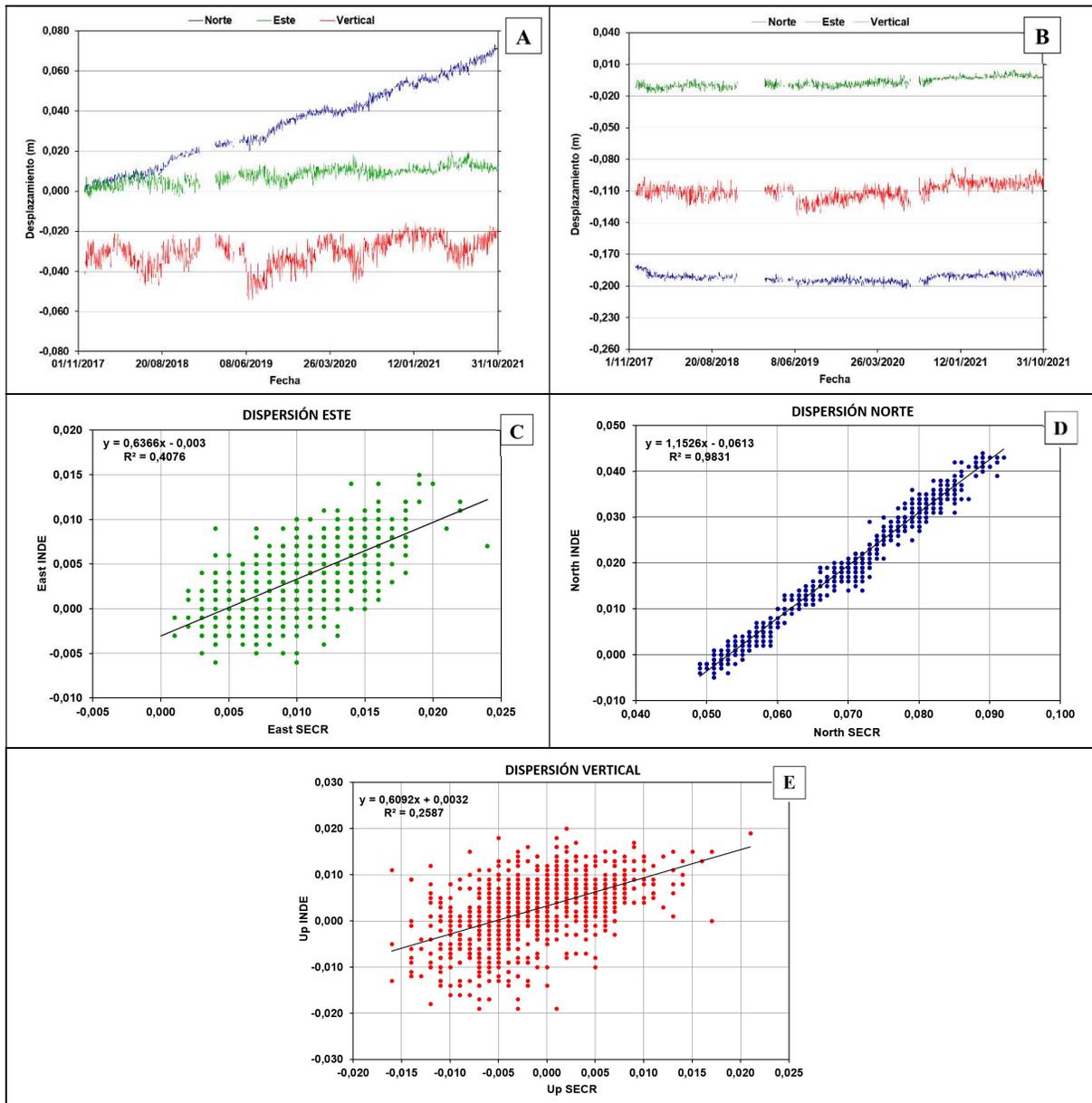
La estación GNSS GUAL está localizada a 1,9 km al NW del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 5, 14 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 64A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia MRAL de 42,30 %, 99,45 % y 58,48 % para las componentes Este (Figura 64C), Norte (Figura 64D) y Altura (Figura 64E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación GNSS de referencia LAGU (Figura 64B), el cual evidencia estabilidad para las componentes Este y Norte. Para la componente vertical se observa una deformación positiva de 42 mm desde septiembre de 2014 hasta octubre de 2017 y otra deformación positiva de 14 mm desde octubre de 2018 hasta marzo de 2020. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación GUAL y MRAL es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 40 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es moderado evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones GUAL y MRAL es similar.



**Figura 64.** A: serie de tiempo de la estación GNSS GUAL para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas finales mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS GUAL con la corrección a partir de la estación de referencia LAGU, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación GUAL y la estación de referencia MRAL. D: correlación para la componente Norte entre la estación GUAL y la estación de referencia MRAL. E: correlación para la componente Altura entre la estación GUAL y la estación de referencia MRAL.

### 9.2.3 Estación INDE con Procesamiento Orbitas Finales

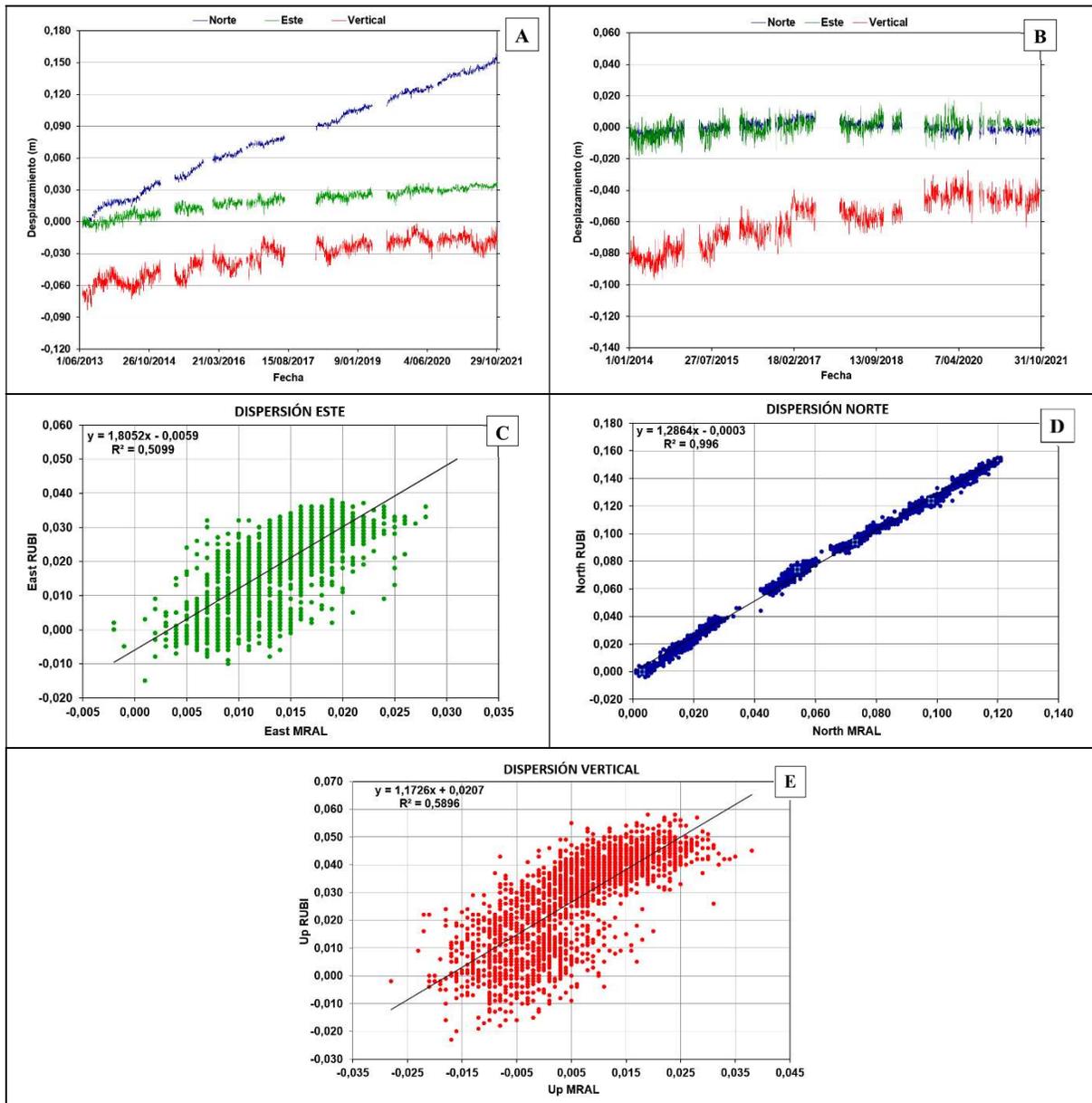
La estación GNSS INDE está localizada a 5,3 km al NW del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 1, 13 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 65A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia SECR de 40,76 %, 98,31 % y 25,87 % para las componentes Este (Figura 65C), Norte (Figura 65D) y Altura (Figura 65E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación GNSS de referencia MRAL (Figura 65B), el cual evidencia estabilidad para el periodo comprendido entre el 1 de noviembre de 2017 y el 31 de octubre de 2021 en las tres componente Este, Norte y Altura. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación INDE y SECR es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 40 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones INDE y SECR es diferente.



**Figura 65.** A: serie de tiempo de la estación GNSS INDE para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas finales mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS INDE con la corrección a partir de la estación de referencia MRAL, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación INDE y la estación de referencia SECR. D: correlación para la componente Norte entre la estación INDE y la estación de referencia SECR. E: correlación para la componente Altura entre la estación INDE y la estación de referencia SECR.

#### 9.2.4 Estación RUBI con Procesamiento Orbitas Finales

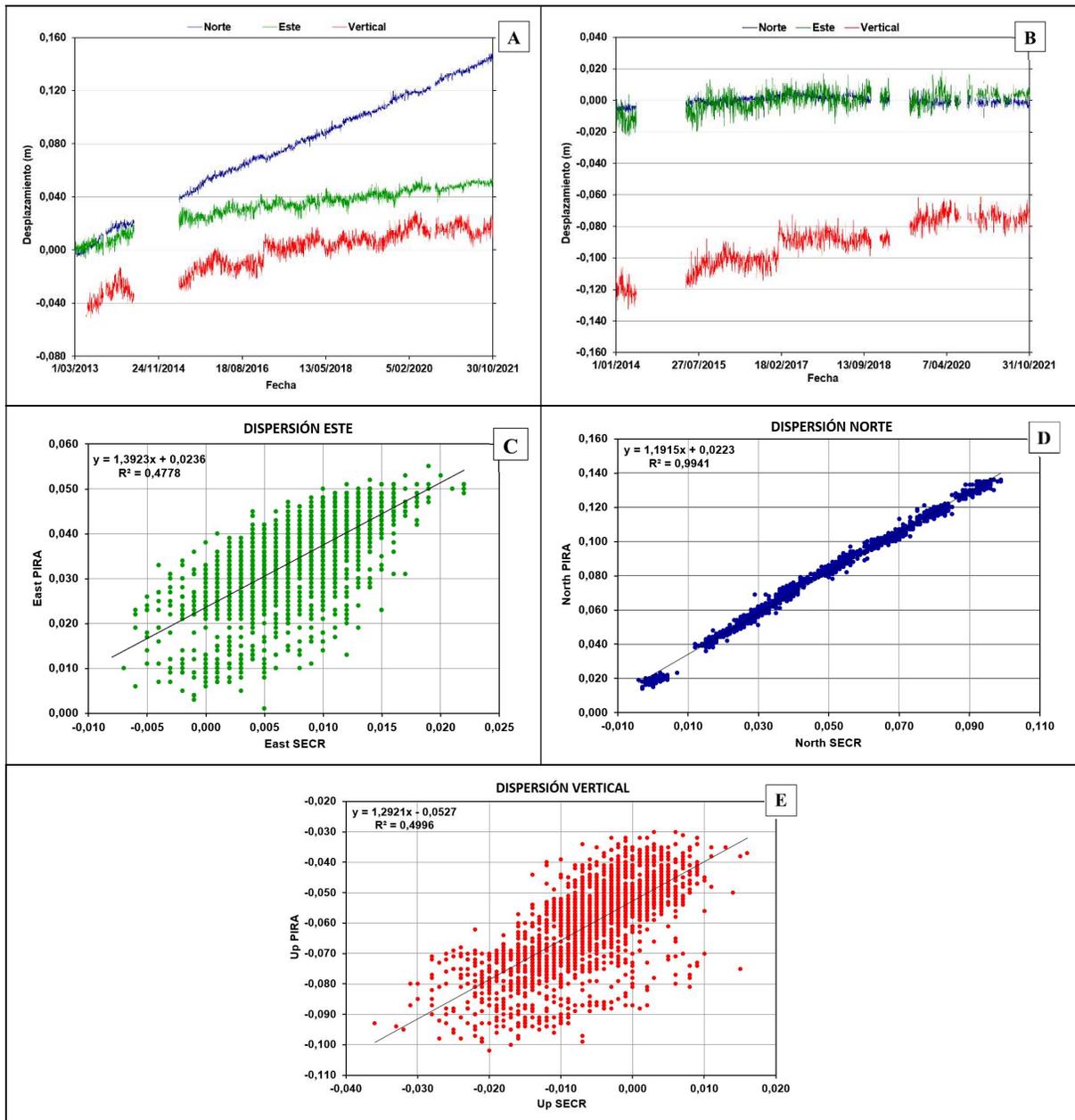
La estación GNSS RUBI está localizada a 4 km al NE del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 5, 17 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 66A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia MRAL de 50,99 %, 99,60 % y 58,96 % para las componentes Este (Figura 66C), Norte (Figura 66D) y Altura (Figura 66E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación GNSS de referencia LAGU (Figura 66B), el cual evidencia estabilidad en las componentes Este y Norte para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2014 y el 31 de octubre de 2021. Para la componente vertical se observa una deformación positiva de 27 mm entre septiembre de 2014 y abril de 2017 y otro evento de deformación positiva de 18 mm desde octubre de 2019 hasta marzo de 2020. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación RUBI y MRAL es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 50 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es moderado evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones RUBI y MRAL es similar.



**Figura 66.** A: serie de tiempo de la estación GNSS RUBI para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas finales mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS RUBI con la corrección a partir de la estación de referencia LAGU, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación RUBI y la estación de referencia MRAL. D: correlación para la componente Norte entre la estación RUBI y la estación de referencia MRAL. E: correlación para la componente Altura entre la estación RUBI y la estación de referencia MRAL.

### 9.2.5 Estación PIRA con Procesamiento Orbitas Finales

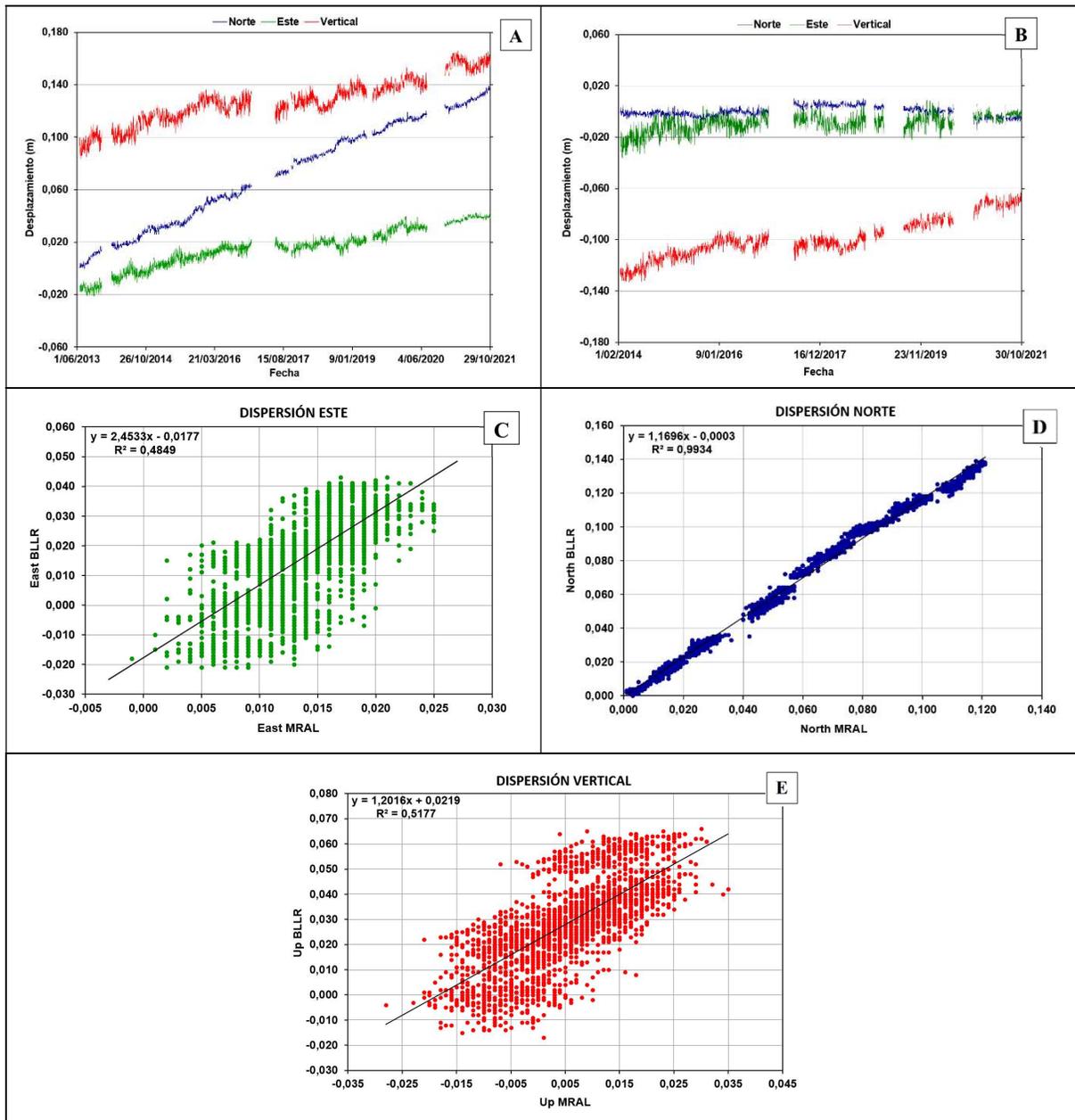
La estación GNSS PIRA está localizada a 4,15 km al NE del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 5, 16 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 67A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia SECR de 47,78 %, 99,41 % y 49,96 % para las componentes Este (Figura 67C), Norte (Figura 67D) y Altura (Figura 67E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación GNSS de referencia LAGU (Figura 67B), el cual evidencia estabilidad en las componente Este y Norte para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2014 y el 31 de octubre de 2021. Para la componente vertical se registra una deformación positiva de 24 mm desde abril de 2014 hasta enero de 2016 y otra deformación positiva de 18 mm desde marzo de 2019 hasta marzo de 2020. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación PIRA y SECR es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 50 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es moderado evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones PIRA y SECR son similares.



**Figura 67.** A: serie de tiempo de la estación GNSS PIRA para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas finales mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS PIRA con la corrección a partir de la estación de referencia LAGU, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación PIRA y la estación de referencia SECR. D: correlación para la componente Norte entre la estación PIRA y la estación de referencia SECR. E: correlación para la componente Altura entre la estación PIRA y la estación de referencia SECR.

### 9.2.6 Estación BLLR con Procesamiento Orbitas Finales

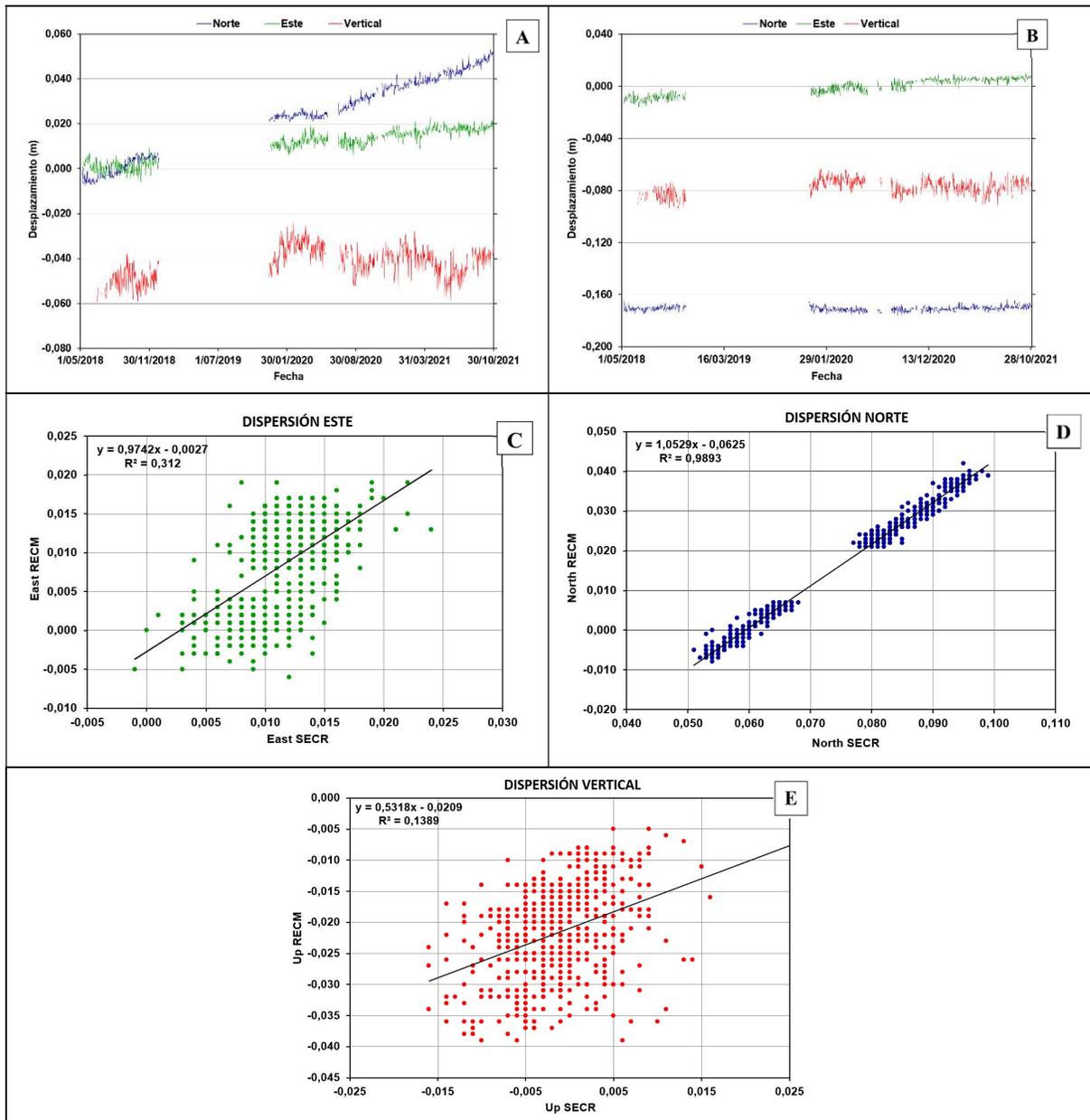
La estación GNSS BLLR está localizada a 10,46 km al SE del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 9, 16 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 68A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia SECR de 48,49 %, 99,34 % y 51,77 % para las componentes Este (Figura 68C), Norte (Figura 68D) y Altura (Figura 68E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación de referencia LAGU (Figura 68B), el cual evidencia un proceso deformativo positivo de 14 mm en la componente Este desde julio de 2014 hasta octubre de 2015. Para la componente Norte se identifican un proceso deformativo positivo de 6 mm desde diciembre de 2015 hasta enero de 2016 y otra deformación positiva de 4 mm desde diciembre de 2016 hasta junio de 2017. Para la componente vertical se observa un evento deformativo positivo de 29 mm desde mayo de 2014 hasta diciembre de 2015 y otro evento deformativo positivo de 30 mm desde octubre de 2018 hasta marzo de 2021. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación BLLR y SECR es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 50 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es moderado evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones BLLR y SECR es similar.



**Figura 68.** A: serie de tiempo de la estación GNSS BLLR para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas finales mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS BLLR con la corrección a partir de la estación de referencia LAGU, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación BLLR y la estación de referencia MRAL. D: correlación para la componente Norte entre la estación BLLR y la estación de referencia MRAL. E: correlación para la componente Altura entre la estación BLLR y la estación de referencia MRAL.

### 9.2.7 Estación RECM con Procesamiento Orbitas Finales

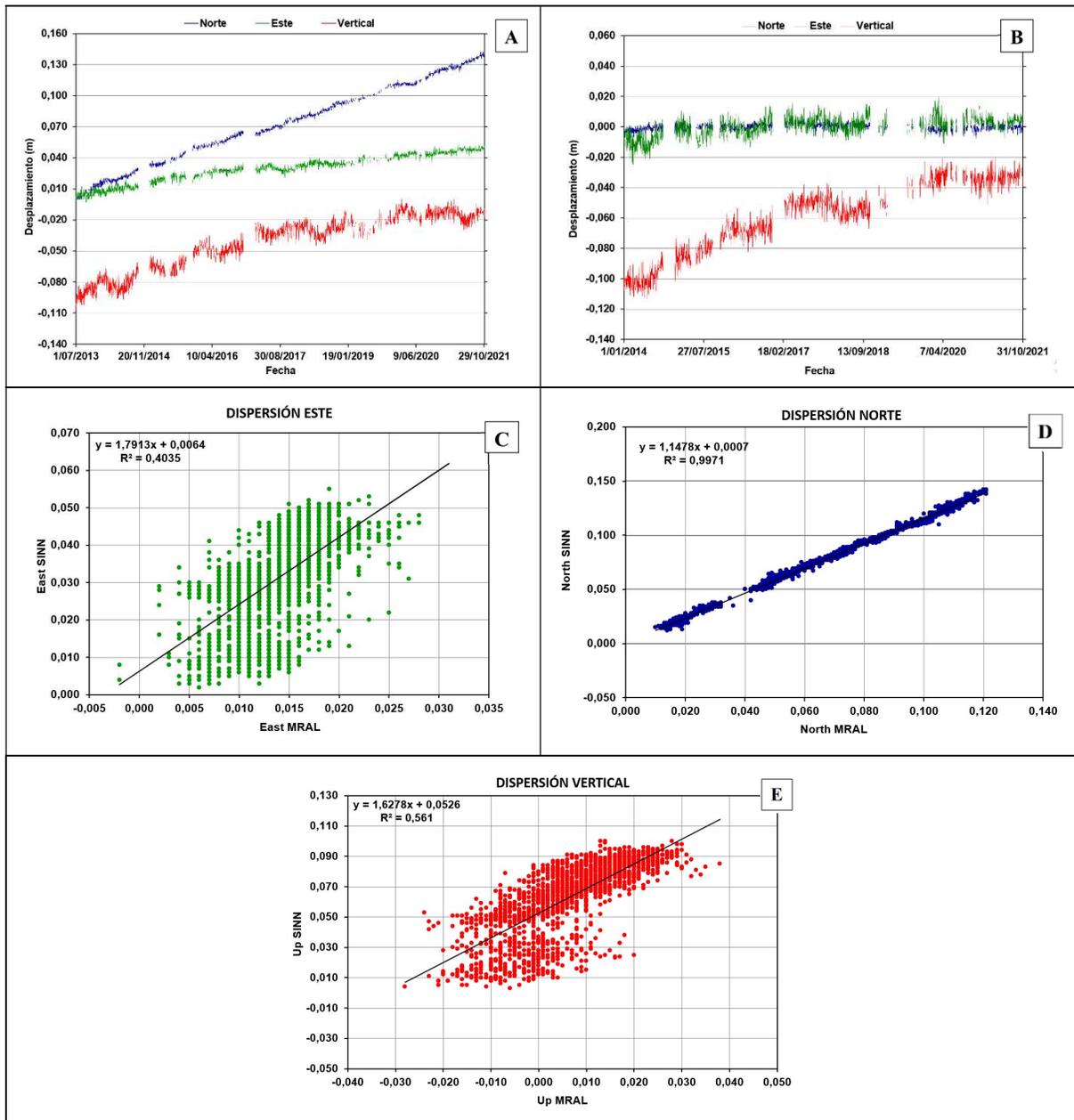
La estación GNSS RECM está localizada a 3,83 km al SW del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 5, 8 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 69A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia SECR de 31,20 %, 98,93 % y 13,89 % para las componentes Este (Figura 69C), Norte (Figura 69D) y Altura (Figura 69E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación GNSS de referencia MRAL (Figura 69B), el cual evidencia estabilidad en las componentes Este, Norte y Altura para el periodo comprendido entre el 1 de mayo de 2018 y el 31 de octubre de 2021. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación RECM y SECR es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 30 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es bajo evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones RECM y SECR es diferente.



**Figura 69.** A: serie de tiempo de la estación GNSS RECM para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas finales mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS RECM con la corrección a partir de la estación de referencia MRAL, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación RECM y la estación de referencia SECR. D: correlación para la componente Norte entre la estación RECM y la estación de referencia SECR. E: correlación para la componente Altura entre la estación RECM y la estación de referencia SECR.

### 9.2.8 Estación SINN con Procesamiento Orbitas Finales

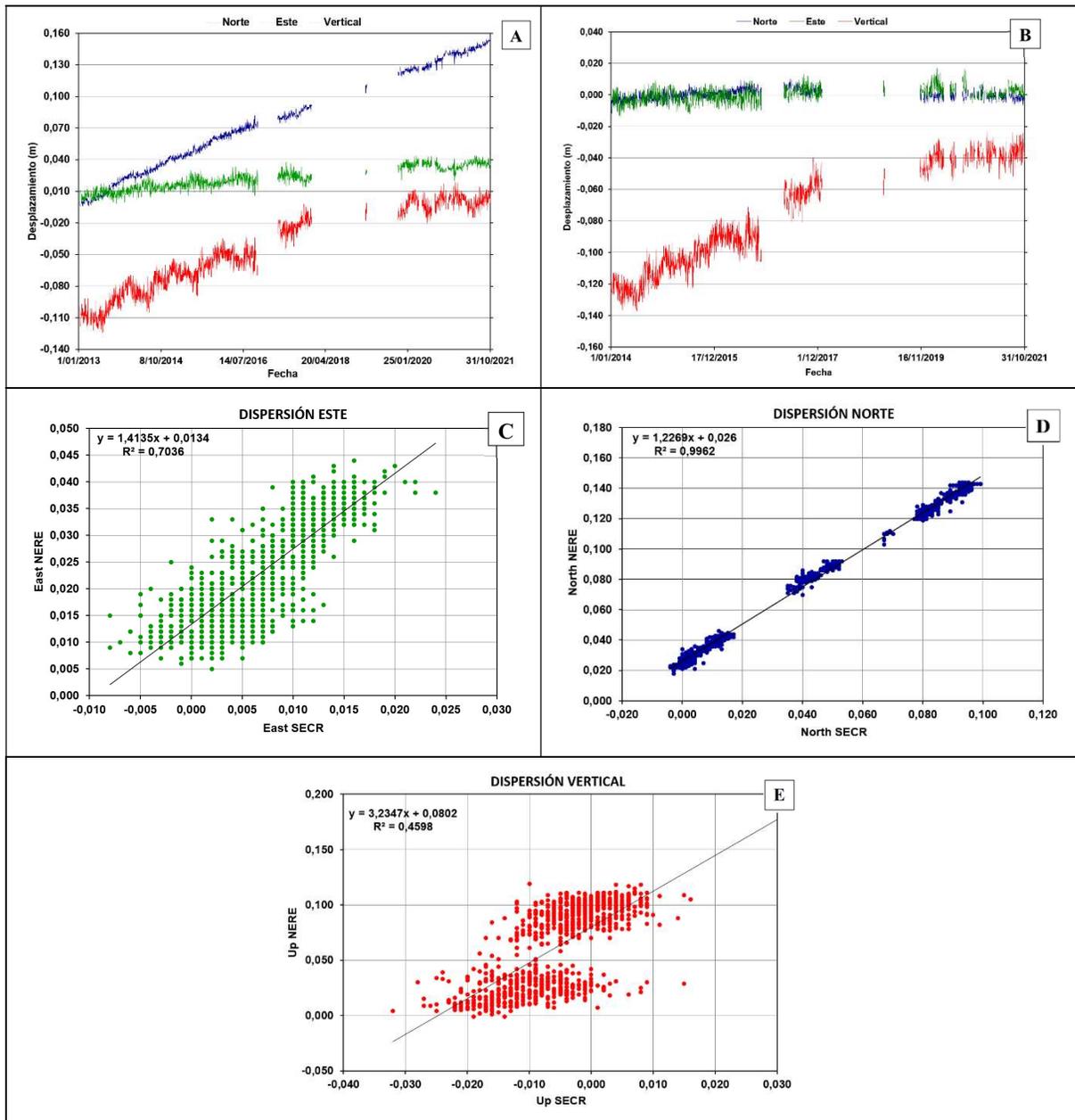
La estación GNSS SINN está localizada a 3,83 km al SW del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 7, 15 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 70A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia MRAL de 40,35 %, 99,71 % y 56,10 % para las componentes Este (Figura 70C), Norte (Figura 70D) y Altura (Figura 70E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación GNSS de referencia LAGU (Figura 70B), el cual evidencia estabilidad en la componente Norte para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2014 y el 31 de octubre de 2021. Para la componente Este se observa un evento deformativo positivo de 11 mm desde abril de 2014 hasta enero de 2015. Para la componente vertical se identifica un evento deformativo positivo de 33 mm desde julio de 2014 hasta enero de 2016 y otro evento deformativo positivo 25 mm desde octubre de 2018 hasta mayo de 2020. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación SINN y MRAL es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 40 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es moderado evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones SINN y MRAL es similar.



**Figura 70.** A: serie de tiempo de la estación GNSS SINN para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas finales mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS SINN con la corrección a partir de la estación de referencia LAGU, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación SINN y la estación de referencia MRAL. D: correlación para la componente Norte entre la estación SINN y la estación de referencia MRAL. E: correlación para la componente Altura entre la estación SINN y la estación de referencia MRAL.

### 9.2.9 Estación NERE con Procesamiento Orbitas Finales

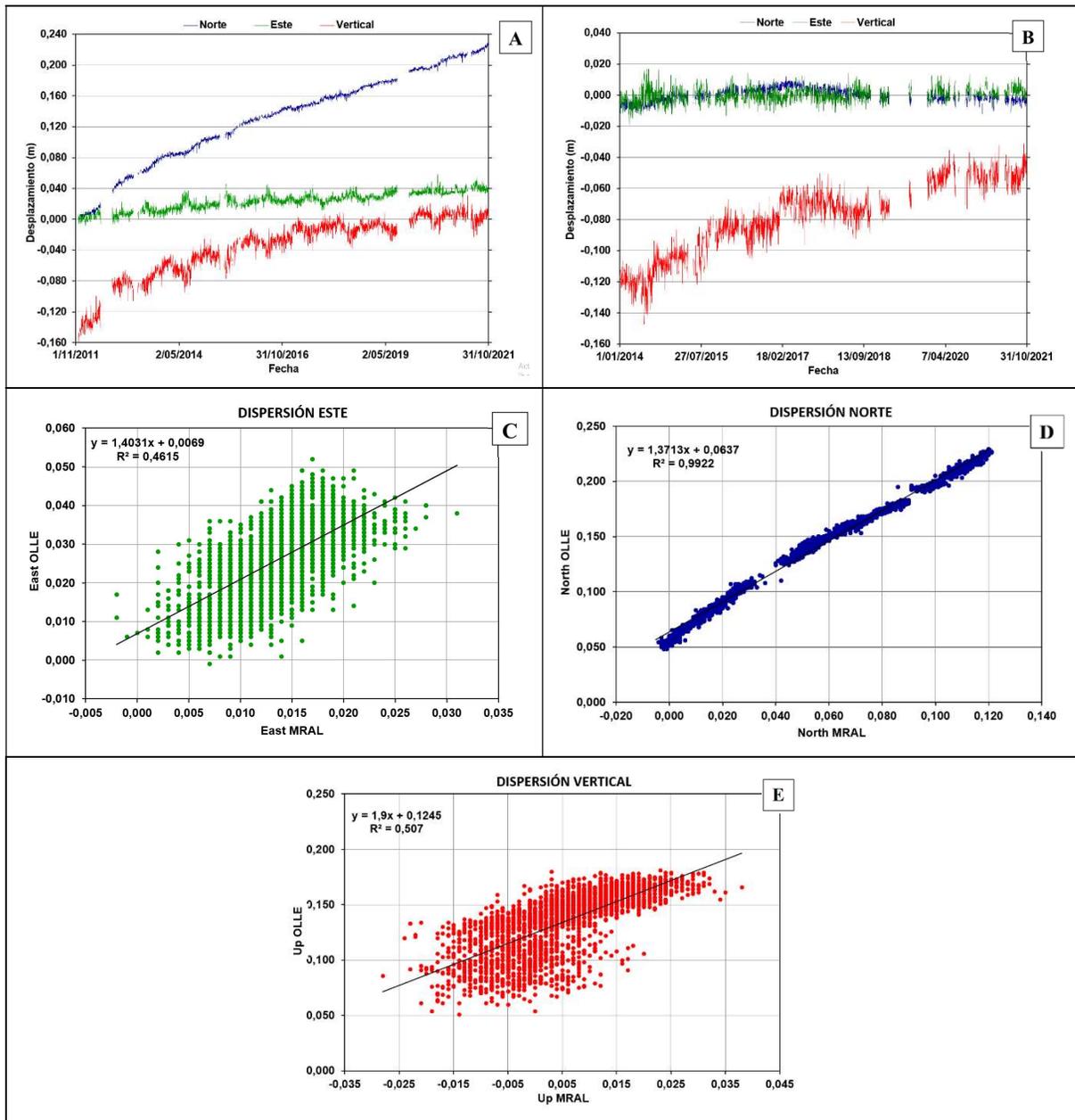
La estación GNSS NERE está localizada a 3,98 km al SW del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 5, 16 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 71A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia SECR de 70,36 %, 99,62 % y 45,98 % para las componentes Este (Figura 71C), Norte (Figura 71D) y Altura (Figura 71E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico corregida con la estación GNSS de referencia LAGU (Figura 71B), el cual evidencia estabilidad en las componentes Este y Norte para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2014 y el 31 de octubre de 2021. Para la componente vertical se observa un proceso deformativo positivo de 36 mm desde julio de 2014 hasta febrero de 2016 y otro evento deformativo positivo de 28 mm desde octubre de 2016 hasta febrero de 2020. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación NERE y SECR es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 70 % ya que esta componente presenta una moderada velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es moderado evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones NERE y SECR es similar.



**Figura 71.** A: serie de tiempo de la estación GNSS NERE para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas finales mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS NERE con la corrección a partir de la estación de referencia LAGU, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación NERE y la estación de referencia SECR. D: correlación para la componente Norte entre la estación NERE y la estación de referencia SECR. E: correlación para la componente Altura entre la estación NERE y la estación de referencia SECR.

### 9.2.10 Estación OLLE con Procesamiento Orbitas Finales

La estación GNSS OLLE está localizada a 4,1 km al W del Cráter Arenas. El comportamiento del bloque tectónico sobre el cual está construida se mueve a una velocidad anual de 3, 15 y 3 mm/año para las componentes Este, Norte y Altura respectivamente (Figura 72A). Según los coeficientes de correlación obtenidos a partir de la estación GNSS de referencia MRAL de 46,15 %, 99,22 % y 50,70 % para las componentes Este (Figura 72C), Norte (Figura 72D) y Altura (Figura 72E) respectivamente, se hace la remoción del efecto tectónico para obtener el comportamiento volcánico con la estación GNSS de referencia LAGU (Figura 72B), el cual evidencia estabilidad en la componente Este para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2014 y el 31 de octubre de 2021. Para la componente Norte se observa una deformación positiva de 15 mm desde junio de 2014 hasta marzo de 2017. Para la componente vertical se observa un proceso deformativo positivo de 37 mm desde julio de 2014 hasta febrero de 2016, otro evento de 16 mm desde septiembre de 2016 hasta marzo de 2017 y otro evento de 23 mm desde marzo de 2019 hasta abril de 2020. El porcentaje de correlación para la componente Norte es muy alto, lo cual evidencia que el comportamiento tectónico de la estación OLLE y MRAL es similar. El porcentaje de correlación para la componente Este es cercano al 50 % ya que esta componente presenta una pequeña velocidad de deformación del bloque tectónico. El porcentaje de correlación para la componente vertical es moderado evidenciando que la velocidad de la componente vertical de las estaciones OLLE y MRAL es similar.



**Figura 72.** A: serie de tiempo de la estación GNSS OLLE para las componentes Norte (azul), Este (verde) y Altura (rojo) obtenida mediante el procesamiento con orbitas finales mostrando el comportamiento tectónico. B: serie de tiempo para la estación GNSS OLLE con la corrección a partir de la estación de referencia LAGU, mostrando el comportamiento volcánico. C: correlación para la componente Este entre la estación OLLE y la estación de referencia MRAL. D: correlación para la componente Norte entre la estación OLLE y la estación de referencia MRAL. E: correlación para la componente Altura entre la estación OLLE y la estación de referencia MRAL.

## 10. Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo se logró apoyar el procesamiento de los datos de las estaciones GNSS de la red de deformación del VNR a través de la plataforma del servidor en línea del Sistema de Referencia Espacial Canadiense (SRSC). Este apoyo permitió que el SGC – OVSM realizara el monitoreo de la deformación del VNR en tiempo cuasi real, es decir procesando los datos GNSS del día anterior con orbitas ultra-rápidas y rápidas, así como procesando los datos GNSS con un retraso promedio de 20 días empleando orbitas finales y obteniendo alta precisión.

Se revisó y alimento permanente la base de datos de las estaciones GNSS de la red de deformación del VNR, así como de los volcanes que conforman el SVNC. La base de datos es administrada y controlada por un sistema de gestión de manera estructurada. La base de datos GNSS posee un volumen de información muy alto porque se administran datos desde 2010.

Se realizó diariamente la conversión de los datos GNSS en formato nativo T02 al formato universal RINEX. Este proceso es fundamental en el SGC – OVSM porque es la base para procesar los datos GNSS.

Permanentemente se utilizó el servidor en línea del CSRS para procesar los datos de las estaciones GNSS de la red de deformación VNR. Este servidor es una herramienta muy poderosa para procesamiento de datos GNSS de cualquier usuario y tipo, y ofrece altísima precisión en la posición de un punto o estación GNSS.

Los datos recibidos del servidor CSRS fueron administrados en archivos Excel en los cuales se generaron y filtraron series de tiempo de las estaciones GNSS del VNR. Las series de tiempo permitieron definir el comportamiento deformativo de cada estación y por consiguiente del volcán.

Se obtuvo series de tiempo con el comportamiento tectónico de las estaciones GNSS del VNR que permitieron calcular las tasas de velocidad tectónica de los bloques sobre los cuales están construidas las estaciones GNSS del VNR.

Se emplearon tres estaciones GNSS de la red de deformación del VCM para remover el efecto tectónico de las estaciones GNSS del VNR. Este proceso permitió generar series de tiempo con el comportamiento volcánico de las estaciones GNSS del VNR, por consiguiente conocer el comportamiento deformativo del VNR el cual es usado por el SGC – OVSM para definir el estado de actividad del volcán.

Las series de tiempo con el comportamiento volcánico de las estaciones GNSS del VNR se generaron para el periodo 2014 – 2021. La componente vertical de las diez estaciones instaladas en el VNR evidencian un proceso inflacionario desde 2014 hasta principios de 2018 a partir de los datos obtenidos con el procesamiento con orbitas finales. Este trabajo no contempla los datos de 2011 a 2013 para la remoción del efecto tectónico de las estaciones debido a un problema técnico de formato en el servidor CSRS.

El procesamiento de los datos GNSS empleando las orbitas ultra-rápidas, rápidas y finales permitió calcular las velocidades de deformación de las estaciones GNSS del VNR, las cuales muestran un patrón consistente hacia el NNE con velocidades promedio 5 mm y 15 mm para las componentes Este y Norte respectivamente. Este comportamiento tectónico es coherente

con los estudios realizados por el proyecto GEORED del SGC (<https://geored2.sgc.gov.co/redgnss/Paginas/Velocidades-de-desplazamiento-.aspx>) donde las velocidades de deformación para los bloques de las zonas del VNR son similares.

Las estaciones GNSS del VCM no registran deformación volcánica, evidenciando gran estabilidad en su comportamiento y registrando claramente la deformación tectónica de los bloques sobre los cuales está construido el volcán. Esta deformación tectónica fue correlacionada con la deformación tectónica de las estaciones del VNR y se obtuvo porcentajes muy altos de correlación para la componente Norte, porcentajes de correlación moderados para la componente Este y porcentajes de correlación moderados a bajos para la componente vertical. Estas correlaciones evidencian la deformación de los bloques del VNR hacia el NNE, siendo la deformación de la componente Norte mayor y menor para la componente Este. El comportamiento de la componente vertical no es afectado por el comportamiento tectónico.

## Referencias Bibliográficas

- Acosta, J., Velandia, F., Osorio, J., Lonergan, L., y Mora, H. (2007). Strike-slip deformation within the Colombian Andes. Geological Society, London, Special Publications, 272, 303-319.
- Adamo, L. (2017). 2010 2017 Geodetic Monitoring of Nevado del Ruiz. Tesis de Maestría. Sapienza Università di Roma. Department of Earth Sciences, Sapienza – University of Rome, P.le A. Moro 5, 00185 Rome, Italy. 45 pp.
- Aguirre, O. R. y López, J.A. (2003). Cartografía geológica y petrografía del Stock de Manizales y su relación con sus rocas encajantes. Manizales, Colombia. Trabajo de grado (Geólogo). Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Programa de Geología. 194 p.
- Alpala, J., Alpala, R. y Battaglia, M. (2017). Monitoreo de volcanes remotos: los disturbios de 2010-2012 en el volcán Sotará (Colombia). Revista de investigación de vulcanología y geotermia, 344, 224-231.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., y Métivier, L. (2011). ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. Journal of Geodesy, 85(8), 457-473.
- Álvarez, D. A. G. (2008). Sistema GNSS (global navigation satellite system). Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- Ávila-Barrientos, L., Cabral-Cano, E., Pichardo, F. A. N., Reinoza, C. E., Salazar-Tlaczani, L., y Fernández-Torres, E. (2021). Surface deformation of Ceboruco volcano, Nayarit, Mexico. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 418, 107338.
- Banville, S., Geng, J., Loyer, S., Schaer, S., Springer, T. y Strasser, S. (2020). Sobre la interoperabilidad de los productos IGS para un posicionamiento de puntos preciso con resolución de ambigüedad. Diario de geodesia , 94 (1), 1-15.
- Barbero, I., Torrecillas, C., Prates, G., Páez, R., Garate, J., García, A., y Berrocoso, M. (2018). Assessment of ground deformation following Tenerife's 2004 volcanic unrest (Canary Islands). Journal of Geodynamics, 121, 1-8.
- Barrero, D., y Vesga, C. J., (1976). Mapa geológico del cuadrángulo K 9, Armero y mitad sur del J9, La Dorada. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Bogotá.

- Bohórquez, O., Monsalve, M. L., Velandia, F., Gil-Cruz, F., y Mora, H. (2005). Determinación del Marco Tectónico Regional para la Cadena Volcánica más Septentrional de la Cordillera Central de Colombia. *Boletín de Geología, UIS*, 27 (44): 55-79.
- Boixart, G., Cruz, L. F., Miranda Cruz, R., Euillades, P. A., Euillades, L. D., y Battaglia, M. (2020). Source model for Sabancaya volcano constrained by DInSAR and GNSS surface deformation observation. *Remote Sensing*, 12(11), 1852.
- Borrero, C. y Naranjo, J. (1990). Casabianca Formation: a Colombian example of volcanism - induced aggradation in a fluvial basin. En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol 41, p. 253-267.
- Borrero, C., Toro, L.M., Alvaran, M. y Castillo, H., (2009). Geochemistry and tectonic controls of the effusive activity related with the ancestral Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *Geofísica Internacional*, 48(1): 149-169.
- Botero-Gómez, L.A., Osorio, P., Murcia, H., Borrero, C., y Grajales, J.A. (2018). Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termalés, Cordillera Central, Andes colombianos (Parte I): Características morfológicas y relaciones temporales. *Boletín de Geología*, 40(3), 85-102. DOI: 10.18273/revbol.v40n3-2018005.
- Canavos, G. (1988). *Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y métodos*. Editorial McGraw-Hill.
- Cárdenas, P. (2004). *Modelo y Cartografía Estructural del Sistema de Fallas de Palestina en Sector del Parque Natural de los Nevados*. Tesis de pregrado. Universidad de Caldas. Manizales, 103p.
- Cárdenas, P., Ocampo, P., Cocuy, C., Garcés, J. F., y Marín, L. (2004). *Modelo y Cartografía Estructural del Sistema de Fallas de Palestina y Mulatos*. INGEOMINAS. Bogotá, 104p.
- Chaussard, E., Amelung, F., y Aoki, Y. (2013). Characterization of open and closed volcanic systems in Indonesia and Mexico using InSAR time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(8), 3957-3969.
- Ceballos, J.A., Martínez, L.M., Valencia, L.G., Pulgarín, B.A., Correa, A.M., and Narváez, B.L. (2020A). Geological evolution of the Nevado del Ruiz Volcanic Complex. In: Gómez, J. and Pinilla, A.O. (editors). *The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary*. Servicio Geológico Colombiano, *Publicaciones Geológicas Especiales* 38, p. 267–296. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.07>.

- CHEC, (1983). Investigación Geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz, Vol I y II Bogotá.
- Córdova, L., Alarcón, A., Mardones, C., Cardona, C., Gil, F., Rojas, G., ... y Lundgren, P. (2015). Monitoreo de la deformación en volcanes chilenos mediante técnica GPS, resultados asociados a la actividad de los volcanes Laguna del Maule, Copahue y Villarrica. In XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena: Colegio de Geólogos de Chile.
- Craymer, M. R. (2006a). The evolution of NAD83 in Canada. *Geomatica*, 60(2), 151-164.
- Craymer, M.R. (2006b). The evolution of NAD83 in Canada: Addendum. *Geomatica*. 60(4): 433.
- CSRS (2021). Canadian Spatial Reference System. Recuperado de: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/geodetic-reference-systems/canadian-spatial-reference-system-csrs/9052>.
- Cuéllar, M.A.; Sánchez, C.A. y Valencia, M. (2003a). Caracterización petrográfica y deformativa de las rocas aflorantes en los alrededores de la Falla San Jerónimo, al este del Municipio de Manizales. Tesis (Geólogo). Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Programa de Geología. 179p.
- De Guidi, G., Brighenti, F., Carnemolla, F., Imposa, S., Marchese, S. A., Palano, M., ... y Vecchio, A. (2018). The unstable eastern flank of Mt. Etna volcano (Italy): First results of a GNSS-based network at its southeastern edge. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 357, 418-424.
- Doke, R., Harada, M., y Miyaoka, K. (2018). GNSS Observation and Monitoring of the Hakone Volcano and the 2015 Unrest. *Journal of Disaster Research*, 13(3), 526-534.
- Donahue, B. 2017. Canadian Geodetic Survey, NRCan. Personal communication.
- Dow, JM, Neilan, RE y Rizos, C. (2009). El servicio GNSS internacional en un panorama cambiante de sistemas mundiales de navegación por satélite. *Revista de geodesia*, 83 (3), 191-198.
- Gómez, J., Montes, N.E., Novia, A., y Diederix, H. (2015). Mapa Geológico de Colombia (2015). Escala, 1, 1000000. Servicio Geológico Colombiano.
- Gonzales, H. Maya, M. (1995). Unidades Litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. En: *Boletín Geológico*. Vol. 35. No. 2-3. Ingeominas.
- Gonzales, H., (2001). Geología de las planchas 206, Manizales y 225, Nevado del Ruiz. Memoria Explicativa Escala 1:100.000. Ingeominas. Informe Técnico.

- González, H. (1993). Mapa geológico de Caldas, escala 1:250.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS. Bogotá, 62p.
- González, H., (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina): Boletín Geológico, Ingeominas, V. 23, pp. 1174.
- Gonzales, H. 1989. Análisis de la nomenclatura estratigráficas de las rocas metamórficas (Litodema A), al este del límite oriental de la zona de la Falla de Romeral, Cordillera Central, Colombia. Ingeominas, Informe interno, 21 p. Medellín.
- González, L., y Jaramillo, C. (2001). Estudio neotectónico multidisciplinario aplicado a la Falla Villamaría Termales. Tesis de pregrado. Universidad de Caldas. Manizales, 168p.
- González, L., y Jaramillo, C. (2002). Estudio neotectónico multi-disciplinario aplicado a la Falla VillaMaría-Termales. Tesis de pregrado. Universidad de Caldas, Manizales. 298p.
- Gómez, J., Montes, N.E., Nivia, Á. y Diederix, H., compilers. 2015. Geological Map of Colombia 2015. Scale 1:1 000 000. Servicio Geológico Colombiano, 2 sheets. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/10.143.2015.936>
- González-Garcia, J., y Jessell, M. (2016). A 3D geological model for the Ruiz-Tolima Volcanic Massif (Colombia): Assessment of geological uncertainty using a stochastic approach based on Bézier curve design. *Tectonophysics*, 687, 139-157. doi: 10.1016/j.tecto.2016.09.011.
- Guzmán, G., Franco, G., y Ochoa, M. (1998). Proyecto para la mitigación y el riesgo sísmico de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa. Evaluación Neotectónica. CARDER. Pereira, 144p.
- Hincapié, J. y Camargo, C. (2005). Acerca de la nomenclatura y ambiente de formación de dos unidades de roca aflorantes en el flanco este de la cordillera central, sector de Padua. Memorias X Congreso Colombiano de Geología. Bogotá D.C.
- Ji, K. H., Stamps, D. S., Geirsson, H., Mashagiro, N., Syauswa, M., Kafudu, B., y d'Oreye, N. (2017). Deep magma accumulation at Nyamulagira volcano in 2011 detected by GNSS observations. *Journal of African Earth Sciences*, 134, 824-830.
- López, J. y Aguirre, R. (2005). Tonalita Granodiorita de Manizales: Revisión formal de la nomenclatura litoestratigráfica de la Granodiorita de Manizales (Stock de Manizales). Memorias X Congreso Colombiano de Geología. Bogotá. CD Room.

- Martínez, L., Valencia, L., Ceballos, J., Narváez, B., Pulgarín, B., Correa, A., Navarro, S., Murcia, H., Zuluaga, I., Rueda, J., Pardo, N., (2014). Geología y estratigrafía del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz. Geología de volcanes dirección de geociencias básicas, Internal report of Colombian Geological Survey.
- Maya, M. y González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico*, 35 (2-3): 43-57.
- McCourt, W. J., (1984). The Geology of the Central Cordillera in the Department of Valle del Cauca, Quindío and NW Tolima: British Geological Survey Report, V. Series 84, pp. 849.
- Medina, LN, Arcos, DF y Battaglia, M. (2017). Veinte años (1990-2010) de monitoreo geodésico del volcán Galeras (Colombia) a partir de mediciones continuas de inclinación. *Revista de investigación de vulcanología y geotermia* , 344 , 232-245.
- Mejía Toro, E. (2012.). Características Cinemáticas y Condiciones de Deformación de un Segmento de la Falla Palestina al NE del Volcán Nevado del Ruiz.
- Mejía, E. L., Velandia, F, Zuluaga, C.A., López, J.A., Cramer, T, (2012). Análisis estructural al noreste del volcán Nevado del Ruiz, Colombia Aporte a la exploración geotérmica. *Boletín de Geología*, vol. 34, núm. 1, 2012, pp. 27 41. Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga, Colombia.
- Méndez, R. y Patiño, J. (2003). El Complejo Volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín. IX Congreso Colombiano de Geología, Medellín, Resúmenes, 140 p.
- Microsoft (2013). Ajustes e información. Redmond, Washington, Estados Unidos, Compañía Microsoft. Recuperado de <https://www.microsoft.com/es-es/about/people>.
- Monsalve–Bustamante, M. L. (2020). The volcanic front in Colombia: Segmentation and.
- Morales Rivera, A. M., Amelung, F., y Mothes, P. (2016). Volcano deformation survey over the Northern and Central Andes with ALOS InSAR time series. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(7), 2869-2883.
- Moreno, M. y Pardo, A., (2003). Stratigraphical and sedimentological constrains on western Colombia: implications on the evolution of the Caribbean Plate, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. F. Blickwede, eds., *The CircumGulf of Mexico and the Caribbean: hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*, American Association of Petroleum Geologist, memoir 79, pp. 891-924.
- Mosquera, D. (1978). Geología del Cuadrángulo K-8 Manizales. Informe preliminar 1763. INGEOMINAS.

- Muñoz, F. (1998). La pequeña edad glaciaria en los Nevados del Ruiz y Santa Isabel. Trabajo de Grado, Departamento de Recursos Minerales. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Colombia. 102 pp.
- Naranjo, J. y Ríos, A. (1989). Geología de Manizales y sus alrededores. Y su influencia en los riegos geológicos. Revista Universidad de Caldas. Vol. 10 Nros 1-3. 113p.
- ORACLE. (2002) Oracle Cloud Infraestructura. Oracle Corporation. Empresa global con Austin, Texas, Estados Unidos. Recuperado de <https://www.oracle.com/co/index.html>
- ORACLE. (2020) Oracle Cloud Infraestructura. Oracle Corporation. Empresa global con Austin, Texas, Estados Unidos. Recuperado de <https://www.oracle.com/co/index.html>
- Ordóñez, M. (2018). Instalación de estación GPS permanente para vigilancia de la deformación volcánica en Colombia. Servicio Geológico Colombiano - Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales. Informe interno, 23 pp.
- Ordóñez, M., C. López, J. Alpala, L. Narváez, D. Arcos, and M. Battaglia (2015), Keeping watch over Colombia's slumbering volcanoes, *Eos*, 96, doi:10.1029/2015EO025079. Published on 27 February 2015.
- Ordóñez, M. e Idárraga, J. (2021A). Estaciones GNSS empleadas para medir la deformación del Volcán Nevado del Ruiz: un claro indicador de migración magmática. XVIII Congreso Colombiano de Geología – Ciencias, Sostenibilidad y Sociedades Futuras. 18 al 20 de agosto de 2021. 26 pp.
- Ordóñez, M. et al. Idárraga, J. (2021B). El domo de lava del Volcán Nevado del Ruiz 2015-2021 y la evolución del Cráter Arenas desde 1939. XVIII Congreso Colombiano de Geología – Ciencias, Sostenibilidad y Sociedades Futuras. 18 al 20 de agosto de 2021. 28 pp.
- Peci, L. M., Berrocoso, M., Páez, R., Fernández-Ros, A., y De Gil, A. (2012). IESID: Automatic system for monitoring ground deformation on the Deception Island volcano (Antarctica). *Computers y geosciences*, 48, 126-133.
- Peñañiel, J., y Zayas, J. (2001). Fundamentos del sistema GPS y aplicaciones en la topografía. Delegación territorial de Madrid-Castilla-La Mancha.
- Pierson, TC, Janda, RJ, Thouret, J.-C. y Borrero, CA. (1990). Perturbación y derretimiento de la nieve y el hielo por la erupción del Nevado del Ruiz del 13 de noviembre de 1985, Colombia, y la posterior movilización, flujo y deposición de lahares. *J. Volcan. Geoterma. Res.*, 41 (1-4), 17-66.

- Plazas, J. (2010). Caracterización Petrográfica y Termobarométrica del Stock Tonalítico-Granodiorítico de Manizales. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá, pp. 1-21.
- Pozo-Ruz, A., Ribeiro, A., García-Alegre, M. C., García, L., Guinea, D., y Sandoval, F. (2000). Sistema de posicionamiento global (GPS): Descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro. ETS ingenieros de Telecomunicaciones. Universidad de Malaga.
- Taboada, A., Rivera, L., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., y Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and Intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, Vol. 19 (5): 787-813.
- Thouret, J. C. (1988), ‘‘Geomorfología y Cronoestratigrafía del macizo volcánico Ruiz-Tolima
- Thouret, J. C., Cantagrel, J. M., Salinas, R., y Murcia, A. (1990). Quaternary Eruptive History of Nevado del Ruiz (Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41: 225-251.
- Toro, R. y Osorio, J. (2005). Determinación de los tensores de esfuerzos actuales para el segmento Norte de los Andes calculados a partir de mecanismos focales de sismos mayores. *Boletín de Geología*, 27 (44): 13 – 24.
- Torrecillas Lozano, C., y Martínez García, J. J. (1999). El GPS RINEX y su presencia en España. *Mapping*, 54, 76-82.
- Toussaint, J.-F., y Restrepo A., J. J. (1976). Modelos orogénicos de tectónica de placas en los Andes Colombianos. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (1), 1-47. Recuperado a partir de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/94034>.
- Vílchez Benigno, S. (2019). Descripción y representación de las señales GNSS. Trabajo fin de máster. Universidad Oberta de Catalunya. Departamento de Tecnologías y Radiocomunicación.
- Villagómez, D., y Spikings, R. (2013). Thermochronology and tectonics of the Central and Western Cordilleras of Colombia: Early Cretaceous–Tertiary evolution of the Northern Andes. *Lithos*, 160-161, 228-249. doi: 10.1016/j.lithos.2012.12.008.
- Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., y Beltrán, A. (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central Cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3-4), 875-896. doi: 10.1016/j.lithos.2011.05.003.
- Villavicencio, J. (2010). Introducción a series de tiempo. Puerto Rico.

## Glosario

**Ambigüedad:** número de ciclos enteros desconocidos de la onda emisora que contiene un ininterrumpido conjunto de mediciones que provienen de un único satélite cruzando por un único receptor.

**Banda L:** rango de frecuencias asignado a la telefonía móvil al igual que a las emisiones digitales de audio a nivel mundial.

**Base de datos:** programas con una gran capacidad de almacenamiento de información.

**C/A:(Coarse/Acquisition)** código de adquisición grueso. Elemento de la señal procedente de los satélites GPS que se caracteriza por período de repetición de un milisegundo.

**Clúster:** conjunto de computadoras que están interconectadas trabajando como una sola unidad de proceso de información

**Código:** lenguaje para la comunicación en la cual cadenas seleccionadas arbitrariamente de ceros y unos se asignan para definir un mensaje.

**CRS-PPP:** método de posicionamiento puntual enfocado al post- procesamiento que utiliza los datos del receptor GPS

**Datos crudos:** datos que no se han corregido o procesado diferencialmente.

**Deformación:** cambio de posición, forma o volumen de un material geológico.

**Efemérides:** parámetros orbitales con una precisión alta de cada satélite.

**Elipsoide:** superficie curva cerrada, resultante de la rotación de una elipse sobre su eje menor. Es referencia para cálculos geodésicos.

**Estación:** instrumento que suministra datos a usuarios para obtener mediciones.

**Exactitud:** ajuste o acercamiento al valor o distancia real.

**Galileo:** Sistema Global de Navegación por Satélite de Europa.

**Geoide:** referencia teórica de la tierra por la geodesia que concuerda con el nivel del mar y que se extiende por debajo de los continentes.

**GNSS:** Sistema de Navegación por Satélite que se caracteriza por ser una constelación de satélites que transmiten rangos de señales.

**GPS:** Sistema de Posicionamiento Global que se identifica por ser un sistema de radionavegación de los Estados Unidos.

**GLONAS:** Sistema Global de Navegación por Satélite (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) de Rusia.

**INSAR:** interferometría radar de apertura sintética la cual se describe por ser una técnica radar utilizada en geodesia.

**Línea base:** distancia tridimensional del vector entre un par de estaciones para que los datos GPS, tomados simultáneamente, sean calculados y nos determine esta longitud.

**Monitoreo:** control o vigilancia de un objeto o estructura.

**Navegable:** archivos que contienen datos orbitales.

**NAVSTAR:**(Navigation System and Ranging) sistema de navegación y determinación de alcance.

**Observable:** archivos que se miden en ciclos completos y no necesitan corrección.

**Pseudorange:** distancia medida que no se le ha corregido los errores de sincronización.

**PVT:**(Position, Velocity, Time) abreviaturas con las que se identifica la unión de estos tres datos.

**Receptor:** instrumento que recibe las señales del satélite y las convierte en señales que se pueden ver u oír.

**Repositorio:** lugar donde se archivan los datos obtenidos.

**Retardo atmosférico:** tiempo de demora que afecta a la señal del satélite debido a las capas de la ionosfera y troposfera.

**Retardo ionosférico:** tiempo de tardanza de la onda de propagación que atraviesa la ionosfera a raíz del contenido de electrones que la afectan.

**RINEX:** formato universal de intercambio entre receptores independientes con un formato de fichero de texto orientado a almacenar por lo que es legible por cualquier software de cualquier marca.

**Satélite:** instrumento que se encuentra orbitando alrededor de la tierra con fines científicos o comunicaciones.

**SCRIPT:** secuencia de comandos que se utiliza para designar programas relativamente simples.

**Segmento Espacial:** parte del sistema satelital.

**Señal:** onda electromagnética con una longitud de banda necesaria para asegurar la comunicación.

**Serie de tiempo:** secuencia de datos en un intervalo de tiempo separados de modo regular para mostrar su evolución.

**Servicio de posicionamiento preciso (PPS):** precisión en el posicionamiento de un punto de más alto nivel dado por el sistema GPS.

**Tiempo GPS:** sistema de tiempo uniforme determinado con el tiempo universal coordinado (UTC).

**TTF (Time to fix first)** tiempo que tarda un receptor GPS en recibir la posición primera de los satélites.

**UTC:** (Universal time coordinated) tiempo universal coordinado uniforme con el que se mide la hora en cada zona del mundo.

**WAYPOINT:** punto con una latitud, longitud, altura definida.